

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ANNA LETÍCIA PEREIRA SILVA CAMINHAS

MÉTODO ALTERNATIVO PARA ESTIMAR A REATIVIDADE DE CORRETIVOS
DE ACIDEZ DO SOLO

UBERLÂNDIA

2025

ANNA LETÍCIA PEREIRA SILVA CAMINHAS

MÉTODO ALTERNATIVO PARA ESTIMAR A REATIVIDADE DE CORRETIVOS
DE ACIDEZ DO SOLO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Área de concentração: Fertilidade do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira.

UBERLÂNDIA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C183m Caminhas, Anna Letícia Pereira Silva, 2000-
2025 Método alternativo para estimar a reatividade de corretivos de acidez
do solo [recurso eletrônico] / Anna Letícia Pereira Silva Caminhas. -
2025.

Orientador: Hamilton Seron Pereira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5168>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Pereira, Hamilton Seron, 1968-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Agronomia. III. Título.

CDU: 631

André Carlos Francisco
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 008/2025, PPGAGRO				
Data:	Vinte e nove de abril de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	12312AGR002				
Nome do Discente:	Anna Letícia Pereira Silva Caminhas				
Título do Trabalho:	Método alternativo para estimar a reatividade de corretivos de acidez do solo				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Uso e Recuperação de Solos e Resíduos na Agricultura				

Reuniu-se na sala 1BCG 115 - Campus Glória, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Wedisson Oliveira Santos - UFU; Lucas Carvalho Basílio de Azevedo - UFU; Valdeci Orioli Júnior - IFTM ; Hamilton Seron Pereira - UFU - orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Hamilton Seron Pereira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

APROVADA

Essa dissertação possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? () SIM NÃO (X)

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Hamilton Seron Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2025, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Carvalho Basílio de Azevedo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2025, às 16:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wedisson Oliveira Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2025, às 20:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Valdeci Orioli Júnior, Usuário Externo**, em 05/05/2025, às 15:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6291141** e o código CRC **5A0E31D8**.

ANNA LETÍCIA PEREIRA SILVA CAMINHAS

MÉTODO ALTERNATIVO PARA ESTIMAR A REATIVIDADE DE CORRETIVOS
DE ACIDEZ DO SOLO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Área de concentração: Fertilidade do Solo.

Uberlândia, 29 de abril de 2025.

Banca examinadora:

Hamilton Seron Pereira – Doutorado (USP)

Lucas Carvalho Basílio de Azevedo – Doutorado (USP)

Valdeci Orioli Júnior – Doutorado (UNESP)

Wedisson Oliveira Santos – Doutorado (UFV)

*Ao Heubert, meu marido, companheiro e
incentivador.*

*À Francis, minha mãe, que sempre
investiu na minha educação com amor.*

*Aos meus irmãos, familiares e amigos
que deram apoio e suporte fundamental.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu forças, saúde, sabedoria e condições para realizar este sonho. Em tudo e nos mínimos detalhes, o Senhor me ajudou.

À Francis, minha mãe, por lutar e investir na minha educação. Mesmo diante das dificuldades e com poucos recursos, priorizou meus estudos e acreditou no meu potencial.

Ao Heubert, meu esposo, que enfrentou as dificuldades ao meu lado e sempre trouxe tranquilidade nos momentos de aflição.

Aos meus irmãos, Pedro e Larissa, por me alegrarem e sempre incentivarem os meus sonhos. À minha amada sobrinha Laura, que me motiva a ser sempre a minha melhor versão e a contribuir para um mundo melhor.

A todos os meus familiares e amigos que estiveram comigo ao longo desta jornada, pelas orações, conselhos e amor concedido.

Ao meu orientador, Dr. Hamilton Seron, por oferecer as melhores condições para a realização desta pesquisa e pelo apoio durante a condução do projeto.

Aos membros do Grupo de Pesquisa Silício na Agricultura – GPSI, que foram essenciais em todas as etapas da condução deste trabalho, em especial, às alunas Amanda Araújo, Ana Laura de Mello e Isabela Doukakos.

Aos técnicos João George, Jéssica Mieko, Igor Beloti e Rafael Finzi, por ensinarem, ajudarem e serem imprescindíveis nas avaliações de laboratório.

Ao professor Dr. Fábio Janoni, pelo auxílio nas análises estatísticas, pelas sugestões e pelo apoio.

À banca examinadora, pela participação e valiosa contribuição no aperfeiçoamento da dissertação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo apoio financeiro e por tornarem este sonho possível.

À Universidade Federal de Uberlândia, ao Instituto de Ciências Agrárias e ao Programa de pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade concedida.

RESUMO GERAL

A reatividade dos corretivos de acidez é um importante parâmetro no cálculo da calagem, sendo atualmente determinada pelo método de peneiras. A legislação brasileira considera apenas a granulometria dos corretivos como fator para estimar a reatividade, desconsiderando a solubilidade da rocha de origem dos materiais. Visto isto, o objetivo deste trabalho foi propor um método alternativo e complementar para estimar a reatividade, considerando também a solubilidade dos corretivos. Foram realizados três ensaios com cinco corretivos (Material 1 – 44,23% CaO e 7,68% MgO; Material 2 – 31,73% CaO e 20,26% MgO; Material 3 – 55,58% CaO e 1,84% MgO; Material 4 – 34,62% CaO e 23,79% MgO e Material 5 – 46,17% CaO e 13,44% MgO) e cinco frações granulométricas (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm). O primeiro ensaio foi em laboratório na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), *campus* Umuarama, onde foi desenvolvido o teste químico para estimar a reatividade; a estimativa foi realizada com base no volume de ácido clorídrico (HCl) gasto para manter a solução com água destilada e os corretivos a pH 6. O segundo ensaio consistiu em um teste de incubação de 120 dias para avaliar a reatividade por meio da elevação do pH em água, pH em cloreto de cálcio, dos teores de cálcio e magnésio e redução da acidez potencial dos solos. Por último, foi avaliado o cultivo de sorgo em casa de vegetação a fim de verificar a influência dos corretivos e granulometrias no desenvolvimento da cultura e nos atributos químicos do solo; foram realizadas duas semeaduras para comparar solos com diferentes atributos químicos e poder tampão. As variáveis foram submetidas à análise de variância e quando significativas as médias foram comparadas utilizando teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Por meio do teste químico realizado observou-se que em um mesmo tamanho de partícula os materiais apresentam reatividades diferentes e nas granulometrias mais finas os corretivos reagiram mais. Após o teste de incubação, foi possível inferir que a granulometria é um fator importante para estimar a velocidade de ação dos corretivos no solo, todavia, outros fatores como solubilidade da rocha, teor de neutralizantes, teores de Ca e Mg podem afetar a reatividade. A interação entre materiais e granulometria influenciou no teor de Mg do solo (1ª semeadura) e no teor de Mg foliar (2ª semeadura). A elevação dos teores de Ca e Mg foliar e de Mg no solo foi proporcional a concentração destes elementos em cada material.

Palavras-chave: calagem; granulometria; solubilidade.

GENERAL ABSTRACT

The reactivity of soil acidity correctives is an important parameter in liming calculations and is currently determined by the sieve method. Brazilian legislation considers only the particle size distribution of the correctives as a factor for estimating reactivity, disregarding the solubility of the parent rock of the materials. In this context, the objective of this study was to propose an alternative and complementary method for estimating reactivity, also taking into account the solubility of the correctives. Three experiments were conducted using five corrective materials (Material 1 – 44,23% CaO and 7,68% MgO; Material 2 – 31,73% CaO and 20,26% MgO; Material 3 – 55,58% CaO and 1,84% MgO; Material 4 – 34,62% CaO and 23,79% MgO; and Material 5 – 46,17% CaO and 13,44% MgO) and five particle size fractions (<0,297; 0,297–0,500; 0,500–0,840; 0,840–1,000; and 1,000–1,700 mm). The first experiment was carried out in a laboratory at the Federal University of Uberlândia (UFU), *campus* Umuarama, where a chemical test was developed to estimate reactivity; the estimation was based on the volume of hydrochloric acid (HCl) consumed to maintain the solution with distilled water and the correctives at pH 6. The second experiment consisted of a 120 days incubation test to evaluate reactivity through the increase in pH in water, pH in calcium chloride, calcium and magnesium contents, and the reduction of soil potential acidity. Finally, sorghum cultivation was evaluated in a greenhouse to verify the influence of correctives and particle sizes on crop development and soil chemical attributes; two sowings were carried out to compare soils with different chemical attributes and buffering capacity. The variables were subjected to analysis of variance, and when significant, the means were compared using Tukey's test ($\alpha = 0,05$). The chemical test showed that, within the same particle size, materials presented different reactivities, and that finer particle sizes resulted in greater reactivity of the correctives. After the incubation test, it was inferred that particle size is an important factor for estimating the rate of action of correctives in the soil; however, other factors such as rock solubility, neutralizing power, and Ca and Mg contents can also affect reactivity. The interaction between materials and particle size influenced the Mg content in the soil (first sowing) and the Mg content in leaves (second sowing). Increases in foliar Ca and Mg contents, as well as in soil Mg, were proportional to the concentration of these elements in each material.

Keywords: liming; particle size; solubility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Separação granulométrica e análise química dos corretivos	26
Figura 2 – Metodologia do teste químico para determinar a reatividade do calcário	28
Figura 3 – Volume de ácido clorídrico (HCl – mL) gasto para manter o pH 6 para cada material estudado em função de diferentes frações granulométricas	33
Figura 4 – Implantação do teste de incubação dos solos com diferentes corretivos de acidez e granulometrias. Uberlândia – MG	42
Figura 5 – Processo de avaliação do solo incubado aos 30, 90 e 120 dias após a incubação	44
Figura 6 – Valores médios do pH em água dos materiais corretivos de acidez estudados em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm)	47
Figura 7 – Valores médios do pH em água do solo incubado com granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm) em função dos materiais de correção de acidez	48
Figura 8 – Valores médios do pH em água do solo incubado com corretivos nas granulometrias <0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm aos 30, 90 e 120 dias após a incubação	49
Figura 9 – Valores médios do pH em água do solo incubado com granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm) em função dos materiais de correção de acidez	49
Figura 10 – Valores médios do pH em CaCl ₂ do solo incubado em função do tempo de incubação (30, 90 e 120 dias)	50
Figura 11 – Valores médios do pH em CaCl ₂ do solo incubado com materiais corretivos de acidez em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm)	51
Figura 12 – Média do pH em CaCl ₂ do solo incubado nas granulometrias <0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm em função dos materiais de correção de acidez	51
Figura 13 – Valores médios da acidez potencial (H ⁺ Al), em cmol _c dm ⁻³ , do solo incubado em função do tempo de incubação (30, 90 e 120 dias)	52
Figura 14 – Valores médios de H ⁺ Al (cmol _c dm ⁻³) do solo após incubação com corretivos de acidez em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm)	53

Figura 15 – Valores médios de $H+Al$ ($cmol_c\ dm^{-3}$) do solo incubado nas granulometrias de $<0,297$; $0,297-0,500$; $0,500-0,840$; $0,840-1,000$; $1,000-1,700$ mm em função dos materiais de correção de acidez	54
Figura 16 – Concentração de cálcio ($cmol_c\ dm^{-3}$) do solo em função do tempo de incubação (30 e 120 dias)	54
Figura 17 – Concentração de cálcio ($cmol_c\ dm^{-3}$) do solo em função dos calcários com diferentes concentrações de CaO	55
Figura 18 – Concentração de cálcio ($cmol_c\ dm^{-3}$) do solo em função do tamanho de partícula dos corretivos de acidez	56
Figura 19 – Teores de magnésio (Mg^{2+}) em $cmol_c\ dm^{-3}$ do solo incubado em função do tempo de incubação (30, 90 e 120 dias)	56
Figura 20 – Teores de magnésio (Mg^{2+}), em $cmol_c\ dm^{-3}$, do solo após incubação com calcários em função de diferentes granulometrias ($<0,297$; $0,297-0,500$; $0,500-0,840$; $0,840-1,000$; $1,000-1,700$ mm)	57
Figura 21 – Teores de magnésio (Mg^{2+}) do solo, em $cmol_c\ dm^{-3}$, incubado nas granulometrias de $<0,297$; $0,297-0,500$; $0,500-0,840$; $0,840-1,000$; $1,000-1,700$ mm em função dos materiais de correção de acidez	58
Figura 22 – Extração e determinação dos teores de cálcio e magnésio foliar na cultura do Sorgo. Uberlândia, MG	70
Figura 23 – Equação quadrática do teor de magnésio foliar ($g\ kg^{-1}$) para cada material corretivo em função de diferentes granulometrias ($<0,297$; $0,297-0,500$; $0,500-0,840$; $0,840-1,000$; $1,000-1,700$ mm). Uberlândia, MG. 2025	79
Figura 24 – Teor de magnésio no solo ($cmol_c\ dm^{-3}$) dos materiais 2, 4 e 5 em função do tamanho de partícula ($<0,297$; $0,297-0,500$; $0,500-0,840$; $0,840-1,000$; $1,000-1,700$ mm)	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Abertura das peneiras utilizadas para separação física do calcário	25
Tabela 2 – Poder de neutralização dos corretivos de acidez utilizados no experimento em função da fração granulométrica	27
Tabela 3 – Teores de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) obtidos em função dos diferentes materiais utilizados e sua classificação quanto aos teores de Ca e Mg	27
Tabela 4 – Desdobramento da variável volume gasto de ácido clorídrico – HCl (mL) em função do fator materiais de correção de acidez nos níveis de granulometria (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 1,000; 1,700mm). Uberlândia – MG	31
Tabela 5 – Reatividade dos corretivos em função das diferentes granulometrias estudadas comparadas ao padrão (CaCO ₃ P.A)	31
Tabela 6 – Caracterização química do solo utilizado no teste de incubação. Uberlândia-MG	41
Tabela 7 – Quantidade de corretivo aplicado por parcela	41
Tabela 8 – Caracterização química da amostra do solo utilizado na 1ª semeadura do sorgo, coletado na Universidade Federal de Uberlândia, <i>campus</i> Glória. Uberlândia- MG	67
Tabela 9 – Caracterização química da amostra do solo utilizado na 2ª semeadura do sorgo, coletado na área rural de Uberlândia, Cruz Branca (Estrada Municipal 371, Km 30). Uberlândia- MG	68
Tabela 10 – Quantidade de corretivo aplicado por unidade experimental na 1ª e 2ª semeadura	68
Tabela 11 – Média das variáveis massa seca foliar na cultura do sorgo (g), teor de cálcio e magnésio foliar na cultura do sorgo (g kg ⁻¹), pH em água (H ₂ O) e pH em cloreto de cálcio (CaCl ₂) do solo, acidez potencial (cmol _c dm ⁻³) e teor de cálcio no solo (cmol _c dm ⁻³) em função de diferentes materiais para correção de acidez . 1ª Semeadura. Uberlândia, MG. 2025	74
Tabela 12 – Média das variáveis massa seca foliar na cultura do sorgo (g), teor de cálcio e magnésio foliar na cultura do sorgo (g kg ⁻¹), pH em água (H ₂ O) e pH em cloreto de cálcio (CaCl ₂) do solo, acidez potencial (cmol _c dm ⁻³) e teor de cálcio no solo (cmol _c dm ⁻³) em função de diferentes granulometrias de corretivos de acidez. 1ª Semeadura. Uberlândia, MG. 2025	74
Tabela 13 – Média das variáveis massa seca foliar na cultura do sorgo (g), teor de cálcio e magnésio foliar na cultura do sorgo (g kg ⁻¹), pH em água (H ₂ O) e pH em cloreto de cálcio (CaCl ₂) do solo, acidez potencial (cmol _c dm ⁻³) e teor de cálcio no solo (cmol _c dm ⁻³)	

³) em função de diferentes materiais para correção de acidez. 2ª Semeadura. Uberlândia, MG. 2025 75

Tabela 14 – Média das variáveis massa seca foliar na cultura do sorgo (g), teor de cálcio e magnésio foliar na cultura do sorgo (g kg^{-1}), pH em água (H_2O) e pH em cloreto de cálcio (CaCl_2) do solo, acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em função de diferentes granulometrias de corretivos de acidez. 2ª Semeadura. Uberlândia, MG. 2025 75

Tabela 15 – Resultados do Teste de Dunnett ao comparar a média dos tratamentos com a testemunha a 5% de significância para as variáveis massa seca foliar (g), cálcio foliar (g kg^{-1}), magnésio foliar (g kg^{-1}) e pH em H_2O . 1ª Semeadura do Sorgo. Uberlândia, MG. 2025 76

Tabela 16 – Resultados do Teste de Dunnett ao comparar a média dos tratamentos com a testemunha a 5% de significância para as variáveis pH CaCl_2 , acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), teor de cálcio e magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). 1ª Semeadura do Sorgo. Uberlândia, MG. 2025 76

Tabela 17 – Resultados do Teste de Dunnett ao comparar a média dos tratamentos com a testemunha a 5% de significância para as variáveis massa seca foliar (g), cálcio foliar (g kg^{-1}), magnésio foliar (g kg^{-1}) e pH em H_2O . 2ª semeadura do Sorgo. Uberlândia, MG. 2025 77

Tabela 18 – Resultados do Teste de Dunnett ao comparar a média dos tratamentos com a testemunha a 5% de significância para as variáveis pH CaCl_2 , acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), teor de cálcio e magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). 2ª semeadura do Sorgo. Uberlândia, MG. 2025 77

Tabela 19 – Teor de magnésio foliar na cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) (g kg^{-1}) para cada granulometria em função de diferentes materiais de correção de acidez. Uberlândia, MG. 2025 78

Tabela 20 – Teor de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) por fração granulométrica em função de diferentes materiais de correção de acidez. Uberlândia, MG. 2025 82

Tabela 21 – Equação quadrática do teor de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para cada material corretivo em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm). Uberlândia, MG. 2025 82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	1
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	Panorama geral da acidez em solos cultivados	3
2.2	Efeitos da acidez no solo e no desenvolvimento vegetal	5
2.3	Corretivos utilizados na agricultura e métodos de calagem.....	6
2.4	Parâmetros químicos e físicos dos corretivos de acidez	9
2.5	Fatores que influenciam na reatividade dos corretivos	10
2.6	Solubilidade de minerais em rochas sedimentares e metamórficas.....	12
	REFERÊNCIAS.....	14
	CAPÍTULO I.....	21
	RESUMO.....	21
	ABSTRACT	22
3	INTRODUÇÃO	23
4	MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1	Descrição experimental.....	25
4.2	Metodologia para determinação da reatividade dos corretivos.....	28
4.3	Análise estatística	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
6	CONCLUSÃO.....	34
	REFERÊNCIAS.....	35
	CAPÍTULO II.....	37
	RESUMO.....	37
	ABSTRACT	38
7	INTRODUÇÃO	39
8	MATERIAL E MÉTODOS	41
8.1	Descrição experimental.....	41

8.2	Análises das variáveis de estudo.....	43
8.3	Análise estatística	44
9	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
10	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	CAPÍTULO III	63
	RESUMO.....	63
	ABSTRACT	64
11	INTRODUÇÃO	65
12	MATERIAL E MÉTODOS	67
12.1	Descrição experimental	67
12.2	Variáveis analisadas.....	69
12.3	Análise estatística	71
13	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
14	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO GERAL

Uma das maiores restrições na agricultura que limita o desenvolvimento das culturas e reduz a produtividade é a acidez dos solos (Antwerpen *et al.*, 2022). No Brasil grande parte dos solos agricultáveis são ácidos ($\text{pH} < 5,5$), a deficiência de cálcio e a toxicidade causada por elementos como alumínio (Al) e manganês (Mn) são os fatores que mais têm limitado a produtividade das culturas (Haliski, 2018). O material de origem das rochas e o alto regime pluviométrico são fatores naturais que justificam a pobreza de bases nos solos; já a intensa remoção de bases pelas culturas e a acidificação devido ao excesso de fertilizantes nitrogenados correspondem a atividades antrópicas que geram acidez. Durante o processo de oxidação do amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-) ocorre liberação de H^+ , que passa a ocupar posições de cátions trocáveis lixiviados pelo NO_3^- (Haliski, 2018).

A calagem é a prática responsável por neutralizar a acidez e aliviar a toxicidade por alumínio e outros metais, além de contribuir para a melhoria da estrutura do solo, aumentar a atividade biológica e a ciclagem de nutrientes (Ding *et al.*, 2023). Dentre os corretivos mais utilizados estão os carbonatos, óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio (Paradelo *et al.*, 2015). Os silicatos, por sua vez, também possuem potencial para correção da acidez, o íon silicato (SiO_3^{2-}) ao entrar em contato com a água produz os íons HSiO_3 e OH^- , que neutraliza os íons H^+ além de aumentar a disponibilidade do silício. A qualidade e eficiência da calagem é determinada pela pureza do corretivo, poder de neutralização, reatividade e adequada distribuição no solo (Ray *et al.*, 2022).

A reatividade de um corretivo é um parâmetro físico que corresponde a velocidade com que este é capaz de corrigir a acidez do solo. De acordo com a legislação brasileira a reatividade deve expressar a porcentagem do corretivo que irá reagir em um período de três meses, sendo de 0% para fração que fica retida na peneira ABNT nº10, de 20% para fração que passa na peneira ABNT nº10 e fica retida na peneira ABNT nº20, de 60% para a fração que passa na peneira ABNT nº20 e fica retida na peneira ABNT nº50 e de 100% para o corretivo que passa completamente pela peneira ABNT nº50 (Brasil, 2006).

Na legislação brasileira apenas a granulometria dos corretivos é levada em consideração para determinação da reatividade, desconsiderando aspectos como a solubilidade da rocha de origem. A natureza química, origem geológica, proporção entre carbonatos de cálcio e magnésio também influenciam na reatividade, de modo que o atual

método de peneiras pode induzir ao erro a recomendação da dose de corretivos (Merlotto, 2024).

Recomendações de calagem subestimadas podem ser insuficientes para elevar o pH do solo, reduzir a toxicidade por Al, aumentar a capacidade de troca catiônica e os teores de cálcio e magnésio, limitando o desenvolvimento das culturas de interesse agrônomo. Em contrapartida, superestimar a necessidade de calagem dos solos pode induzir a deficiência de micronutrientes, degradação das propriedades físicas e levar a prejuízos econômicos (Teixeira *et al.*, 2020).

Tendo em vista a limitação apresentada no atual método para determinação de reatividade dos corretivos de acidez e a importância da estimativa correta da calagem para aumentar a qualidade e eficiência desta prática os objetivos deste trabalho foram propor um método químico complementar para avaliar a velocidade de reação de corretivos e validar os resultados obtidos com um teste de incubação e dados de produção em campo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Panorama geral da acidez em solos cultivados

A acidez dos solos é um fator que ocorre em grande extensão territorial no globo terrestre e limita a produção agrícola em diversos níveis. A nível mundial, cerca de 30% dos solos sem cobertura de gelo, 75% dos subsolos e 50% dos solos cultiváveis apresentam $\text{pH} \leq 5,5$, com tendências de aumento nos próximos anos (Du *et al.*, 2024). Estes autores apontam que 60% dos solos ácidos estão localizados em regiões tropicais e subtropicais, incluindo a América Latina.

Em uma mapa do pH global do solo gerado utilizando as médias do World Soil Information Service (WoSIS) é possível visualizar que as regiões Norte da Europa, Polinésia e América do sul apresentam o menor pH médio regional, com médias entre 5,3 e 5,5 (Mosley *et al.*, 2024). Na América Latina cerca de 39% dos solos degradados correspondem a áreas com toxicidade por alumínio e com $\text{pH} < 5$, devido a intensa lixiviação de bases e elevada pluviosidade (Angeline *et al.*, 2015).

No Brasil, a acidez afeta 67% dos solos ($\text{pH} < 5,5$), 27% possuem $\text{pH} > 5,5$ e cerca de 6% possuem potencial hidrogeniônico equivalente a 5,5 (Crespo-mendes *et al.*, 2019). A maior parte dos solos cultivados no país pertencem a classe dos Latossolos, possuem baixa fertilidade natural, baixa CTC, altamente intemperizados, com alta lixiviação das bases, baixa atividade de argila e baixa capacidade de troca catiônica (Sousa, 2021). É indiscutível, portanto, a abrangência e relevância da acidez, que é oriunda de fatores naturais e antrópicos.

A acidez pode ser oriunda da rocha de formação dos solos, já que algumas rochas são naturalmente ácidas; devido a atividades industriais e práticas agricultáveis, como a chuva ácida, uso de fertilizantes, cultivo intenso sem reposição dos nutrientes e da decomposição da matéria orgânica e atividade microbiana (Bian *et al.*, 2013). Em regiões de clima tropical e úmido os solos são mais ácidos, já que a precipitação é naturalmente ácida e os íons de H^+ se equilibram e trocam com outros cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), que são lixiviados junto aos íons HCO_3^- (Mosley *et al.*, 2024).

A fertilidade e acidez natural dos solos dependem da composição mineral da rocha originária, dos tipos e quantidades de minerais presentes (Mansyur *et al.*, 2019). E Dortzbach *et al.* (2016) apontam que a gênese associada aos fatores climáticos afetam a composição do solo, mineralogia, teor de argila e dominância de ferro e alumínio. A

mesma rocha em condições climáticas distintas pode originar solos com características diferentes; a precipitação e temperatura favorecem o intemperismo e favorecem o surgimento de solos profundos, pobres em nutrientes e ácidos (Lima; Lima, 2007).

As chuvas podem ser consideradas como fator de acidificação dos solos, sendo de origem natural ou provocada pela poluição atmosférica. A precipitação de componentes ácidos se dá pela reação do dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x) com a água, oxigênio e outros produtos atmosféricos, resultando em ácido sulfúrico e nítrico; a origem destes gases se dá através de erupções vulcânicas, queima de combustíveis fósseis, produção de energia elétrica e atividades industriais (US EPA, 2024).

O uso de fertilizantes ao longo do tempo na produção agrícola é uma das formas antrópicas de acidificação, principalmente os nitrogenados. Em sua composição os fertilizantes a base de nitrogênio não são ácidos, todavia o processo de nitrificação resulta na acidificação através da oxidação do íon amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-), onde há formação de íons H^+ e consequentemente redução dos valores de pH (Souza *et al.*, 2023). Os autores ainda apontam que em áreas de plantio direto o efeito da adubação nitrogenada é ainda mais intenso na redução do pH e elevação dos teores de alumínio devido ao menor revolvimento do solo.

No processo de decomposição da matéria orgânica diversos compostos orgânicos solúveis em água são liberados no solo por intermédio da atividade microbiana, dentre eles: aminoácidos livres, açúcares e ácidos orgânicos (Pulrolnik, 2009). Os ácidos orgânicos são em sua grande maioria fracos e contribuem como fonte de acidez para os solos (Chahardoli *et al.*, 2020). Ademais, os grupos funcionais presentes em compostos orgânicos como os carboxílicos e hidroxilas fenólicas podem se tornar solúveis em água a depender do arranjo e tamanho das moléculas (Martins *et al.*, 2012) liberando H^+ para o meio.

A grande ocorrência de solos agricultáveis considerados ácidos e as diversas fontes de acidificação do meio são preocupantes quando considerados os efeitos negativos da acidez e das altas concentrações de elementos tóxicos como o alumínio ao desenvolvimento das plantas, impactando diretamente a produção agrícola e consequentemente a produtividade das lavouras. Deste modo, é imprescindível a compreensão de como valores baixos de pH afetam o metabolismo e fisiologia dos vegetais.

2.2 Efeitos da acidez no solo e no desenvolvimento vegetal

O pH afeta a disponibilidade de quase todos os nutrientes, influenciando na sorção dos solos e na absorção pelas plantas, além de afetar a velocidade de decomposição da matéria orgânica; os íons positivos ou negativos presentes nos elementos reagem com os solos em função de sua carga e os elementos ganham ou perdem prótons dependendo do pH da solução (Barrow *et al.*, 2023). O solo apresenta-se como um trocador de cátions, onde a carga da superfície em sua grande maioria é negativa e a capacidade de troca de cátions (CTC) diz respeito a quantidade de cargas que o solo retém por peso ou volume (Raij, 2011).

O declínio do pH do solo pode causar uma série de efeitos adversos, como o decréscimo na disponibilidade de nutrientes, impacto no funcionamento das comunidades microbianas e maior disponibilidade de elementos tóxicos (Zhang *et al.*, 2023). Ao avaliar a relação entre o pH e a disponibilidade dos elementos no solo Malavolta (1979) demonstra a menor disponibilidade de potássio, cálcio, magnésio, nitrogênio, enxofre, boro, molibdênio, cloro e fósforo quando o valor de pH está em torno de 5.

O P presente nos solos é absorvido pelas raízes principalmente como ânions ortofosfato; estes ânions em solos ácidos são transformados em complexos insolúveis e os íons de fosfato são adsorvidos por silicatos em solo de pH quase neutro (Tubana *et al.*, 2023). Já o N, segundo estes autores, é assimilado pelas plantas como amônio (NH_4^+) ou nitrato (NO_3^-), dependendo então dos processos de amonificação, decomposição e nitrificação para assimilação; sendo estes influenciados pela atividade microbiana, que é menor em ambientes ácidos. A maioria dos processos microbiológicos, incluindo a decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, são reduzidos devido à redução do crescimento e reprodução de bactérias e fungos em ambientes ácidos (Gazey *et al.*, 2018). O molibdênio, micronutriente que participa do metabolismo de nitrogênio é um elemento que depende do pH do solo, tendo em vista que o molibdato fixado nas argilas é deslocado dos sítios de adsorção com o aumento das bases (OH^-) no solo (Alves *et al.*, 2022). Para o enxofre, Barrow *et al.* (2023) demonstram uma maior sorção do sulfato e menor mineralização do enxofre orgânico com o decréscimo do potencial hidrogeniônico.

O déficit nutricional gera efeitos de estresse abiótico nos vegetais, afetando o desenvolvimento das plantas, a produção, colheita e pós-colheita (Toivonen *et al.*, 2011). Em situações de estresse nutricional, as consequências incidem na forma de distúrbios

metabólicos refletidos em seu desenvolvimento e funções vitais (Bezerra *et al.*, 2017). Estes autores apontam que o déficit de cada mineral essencial, seja macro ou micronutriente, pode promover efeitos deletérios no crescimento das plantas, que envolvem o abortamento de flores, comprometimento dos processos de biossíntese, diminuição da fotossíntese, malformação e morte de tecidos, clorose e queda de folhas, dentre outras anormalidades. Plantas sob estresse também podem produzir espécies reativas de oxigênio em grandes quantidades, provocando danos oxidativos em diferentes biomoléculas (Lanna *et al.*, 2021).

O crescimento radicular também é afetado pela acidez dos solos, tendo em vista que o crescimento das raízes é favorecido em solos levemente ácidos, com valores de pH entre 5,5 e 6,5 (Taiz *et al.*, 2017). O principal impedimento ao desenvolvimento de raízes no subsolo é a barreira química representada pela acidez, sendo o alumínio o principal responsável por deprimir o crescimento do sistema radicular (Raij, 2009).

As raízes são vulneráveis ao estresse por Al^{3+} , já que este inibe o ciclo celular e diminui o alongamento das células radiculares, além de se ligar as estruturas celulares, incluindo a parede celular, citoesqueleto ou DNA, interferindo em suas funções metabólicas (Kocjan *et al.*, 2025). O Al^{3+} possui sua concentração aumentada em condições de acidez dos solos e seus efeitos deletérios podem ser classificados como morfológicos e fisiológicos, sendo os morfológicos relacionados aos diferentes sintomas nas partes das plantas e os fisiológicos a sua interação com a parede celular, membrana celular e citosol (Bian, 2013).

A fim de evitar e reduzir os danos causados pela acidez do solo e elevação dos teores de elementos tóxicos faz-se necessário o uso da prática de calagem, que é a forma mais tradicional e disseminada elevar o pH dos solos e neutralizar o excesso de íons hidrogênio (Zhang *et al.*, 2023). Intrínsecos a esta prática é fundamental conhecer os métodos de correção e os principais corretivos utilizados na agricultura.

2.3 Corretivos utilizados na agricultura e métodos de calagem

A calagem é uma prática mundialmente conhecida por neutralizar os íons de Al^{3+} que promovem saturação do complexo de troca, reduzindo os efeitos de toxidez e incrementando o valor de pH e a disponibilidade de nutrientes (Garbowski *et al.*, 2023). Solos ácidos cultivados com um bom manejo de calagem não possuem limitações quanto à produtividade devido a disponibilidade de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Tubana *et al.*, 2023). Os

corretivos podem ser compostos por carbonatos de cálcio e ou magnésio, óxidos de cálcio, hidróxidos de cálcio ou silicatos de cálcio (Mahmud *et al.*, 2022).

O calcário dolomítico ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) é o corretivo mais comum, constituído por carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de magnésio (MgCO_3), obtido pela moagem da rocha calcária que geralmente possuem origem de natureza sedimentar ou metamórfica (Primavesi *et al.*, 2004). Sua ação se dá a partir do processo de dissolução do carbonato de cálcio e magnésio, que entram em contato com os íons de hidrogênio (H^+) e liberam íons bicarbonato (HCO_3^-), Ca^{2+} e Mg^{2+} . Os íons HCO_3^- reagem com mais íons H^+ formando gás carbônico (CO_2) e água (H_2O), (Mahmud *et al.*, 2022).

Este corretivo possui ocorrência natural, boa disponibilidade, abundância e boa distribuição geográfica; ademais é um produto de baixa solubilidade em água e sua ação neutralizante depende da superfície de contato e umidade do solo (Rodrighero *et al.*, 2015). Os calcários agrícolas são classificados em dois tipos: calcíticos, que possuem teor de óxido de magnésio inferior a 5% e os dolomíticos, cujo teor de óxido de magnésio é superior a 5% (Miotto, 2009).

A cal virgem agrícola é um corretivo obtido pela calcinação ou queima completa do calcário, sendo constituída pelos óxidos de cálcio e de magnésio (Alcarde, 2005). No processo de neutralização a cal virgem libera Ca^{2+} , Mg^{2+} , OH^- e calor, conferindo-lhe um caráter de base forte (Primavesi *et al.*, 2004). A partir da hidratação da cal virgem é obtida a cal hidratada, constituída por $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) e $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (hidróxido de magnésio) (Alcarde, 2005).

Como alternativa ao uso do calcário tem se utilizado também silicatos de cálcio e de magnésio para corrigir a acidez do solo, sendo que estes possuem ação mais rápida no solo; o silicato de cálcio (CaH_2SiO_4) ao entrar na solução do solo reage com os íons H^+ , liberando Ca^{2+} e ácido silícico (H_4SiO_4) (Mahmud, *et al.*, 2022). Os efeitos benéficos envolvem a correção da acidez; aumento da disponibilidade de Ca, Mg, P e Si; melhor desenvolvimento das plantas em condições de estresse biótico e abiótico; maior crescimento vegetal (Galindo *et al.*, 2020).

Para determinar a quantidade de corretivo a ser aplicada nos solos existem diversos métodos que avaliam a necessidade de calagem, todavia, os primeiros passos envolvem a tomada de decisão quanto à aplicação ou não de corretivos através da amostragem e análise dos solos (Nolla *et al.*, 2004). No Brasil, os métodos utilizados são os de neutralização do Al^{3+} trocável e elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} ; saturação por

bases (V%), métodos de incubação com CaCO_3 e de solução tampão (SMP), (Menezes *et al.*, 2019).

O método da neutralização do Al^{3+} e da elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} leva em consideração as características do solo a ser corrigido e a necessidade da cultura a ser implantada (Alvarez *et al.*, 1999). A fórmula proposta no manual de recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais considera a acidez trocável, saturação por alumínio tolerada pela cultura, capacidade de troca catiônica efetiva, os teores de cálcio e magnésio além do poder tampão do solo.

O método de saturação por bases (V%) engloba a soma de bases (cálcio, magnésio, potássio e sódio), capacidade de troca catiônica e a acidez potencial; é um método mais completo e utilizado em diversos estados (Nolla *et al.*, 2004). Segundo Alvarez *et al.* (1999) considera-se a correlação positiva entre o teor de pH e a saturação por bases do solo, visando elevar o pH até o valor adequado para a cultura a ser plantada.

A incubação do solo em carbonato de cálcio (CaCO_3) é outra metodologia utilizada para determinar a necessidade da calagem. Consiste na adição de CaCO_3 no solo em doses crescentes e sua posterior incubação até completa reação do carbonato com as fontes de acidez (Nolla *et al.*, 2004). Baseado no exposto por Gubiani *et al.* (2013), após o período de incubação é feita uma interpolação dos valores de pH em água em função das diferentes doses aplicadas, obtendo uma equação que permite determinar a quantidade de carbonato de cálcio necessária para elevar o pH ao valor desejado.

O cálculo de calagem feito através do método SMP (Shoemaker, Mclean & Pratt) consiste no uso de uma solução de sais neutros e tampões para determinar um índice SMP baseado na mudança de pH da solução tamponada em face da acidez potencial do solo (Silva *et al.*, 2009). A solução é colocada em contato com o solo e a leitura do pH de suspensão indica a necessidade de calagem para pH 6,0 através de uma tabela construída a partir da calibração dos solos da região incubados com CaCO_3 (Raij *et al.*, 1979).

Independentemente do método utilizado para determinação da calagem a qualidade da substância neutralizante deve ser levada em consideração para o sucesso desta prática. A quantidade de corretivo depende dos aspectos físicos e químicos do material utilizado, além da porcentagem da superfície a ser coberta pela calagem, profundidade de incorporação e dos critérios econômicos (Alvarez *et al.*, 1999).

2.4 Parâmetros químicos e físicos dos corretivos de acidez

Considerando os aspectos químicos e físicos que devem ser levados em consideração na escolha do corretivo o teor de neutralizantes do material, o grau de finura e os teores de cálcio e magnésio são os parâmetros mais relevantes (Kamprath *et al.*, 2005). Os aspectos relacionados a sua qualidade devem ser esclarecidos para que haja um uso mais eficiente dos corretivos e maior adequação para cada situação agrícola (Primavesi, 2004).

O poder de neutralização (PN) é um atributo químico que diz respeito à capacidade do material em corrigir a acidez do solo, sendo seus teores variáveis em função de sua natureza química, proporção dos componentes químicos e das características mineralógicas (Maeda *et al.*, 1996). A capacidade potencial do corretivo em neutralizar é expressa em teor de neutralizantes equivalentes ao carbonato de cálcio (% Eq_{CaCO₃}) presente na amostra (Alcarde *et al.*, 1996). Perante o exposto por Alcarde (2005) a determinação do poder de neutralização não identifica a natureza química do neutralizante e não demonstra se o material é um corretivo de acidez, já que não indica se a base está associada ao cálcio e ao magnésio. O poder de neutralização varia de um material para outro principalmente em função de impurezas, valores mais altos podem ser associados a teores mais elevados de óxidos de cálcio e magnésio e teores mais baixos de componentes inertes e resíduos (Raij *et al.*, 1968).

Para Alcarde *et al.* (1996) o teor de cálcio e magnésio devem ser determinados nos seus teores totais extraídos em solução de HCl e expressos na forma de óxidos (% CaO e MgO), deste modo é possível aferir os neutralizantes que estão associados ao cálcio e ou ao magnésio. Ademais, Alcarde (2005) relata que materiais com ausência ou teores baixos destes elementos indicam que o produto não é corretivo de acidez dos solos. Baseado na legislação vigente no Brasil, a comercialização de corretivos só pode ser realizada se a soma dos teores de óxido de cálcio e magnésio (%) for superior a 43% para o calcário, 68% para a cal virgem e de 30% para as escórias de siderurgia (Primavesi *et al.*, 2004).

A finura do material utilizado como corretivo faz parte dos parâmetros físicos que interferem no poder relativo de neutralização total (PRNT) e consequentemente na qualidade da substância utilizada. De acordo com Alcarde (2005), as espécies neutralizantes possuem baixa solubilidade, de modo que quanto mais moído o corretivo, ou seja, quanto mais fino, maior e mais rápido é o contato com a superfície do solo e,

portanto, mais rápida será sua ação. A granulometria é determinada em termos de capacidade de reação no solo por curtos períodos (Araújo *et al.*, 2009). A análise granulométrica é feita usualmente por via seca, onde a amostra do corretivo completamente seca é transferida para um agitador mecânico de peneiras com diferentes granulometrias por um período de 10 minutos; após esta agitação mecânica é determinado a partir da porcentagem de massa passante em cada peneira a granulometria do material (Alcarde *et al.*, 2016).

Por meio da análise granulométrica é determinada a reatividade do corretivo. A reatividade é a velocidade de ação do corretivo no solo, ou seja, a rapidez com que corrige a acidez (Alcarde, 2005). Nesta mesma publicação, Alcarde (2005) demonstra as taxas de reatividade das partículas de diferentes tamanhos de acordo com a legislação brasileira, onde para as dimensões maiores que 2 mm, de 2 a 0,84 mm, de 0,84 a 0,30 mm e menores que 0,30 mm as reatividades são de 0, 20, 60 e 100%, nesta sequência. As porcentagens de reatividade correspondem ao que irá reagir em um período de três meses, portanto, espera-se que os corretivos menos reativos promovam maior efeito de correção no solo em longo prazo, no que tange o efeito residual dos materiais (Araújo *et al.*, 2009). A reatividade e o efeito residual são grandezas inversas, os materiais mais finos reagem rapidamente e o seu efeito é mantido por um período mais curto do que os materiais de partículas mais grossas (Gonçalves *et al.*, 2011).

O atual método para determinar a reatividade dos corretivos considera a granulometria como fator principal, deixando de lado aspectos fundamentais como solubilidade da rocha, clima, natureza química do material e ainda o tipo de solo. Para Bellingieri *et al.* (1992) a reatividade apresenta apenas uma relação parcial com a qualidade, não devendo refletir a eficiência de um corretivo. A porcentagem de reatividade pode não representar fielmente a quantidade de neutralizantes que reagem em um período de três meses, dado que os demais fatores também podem ter influência na neutralização dos solos, sendo, portanto, passíveis de serem levados em consideração nos métodos de determinação da reatividade.

2.5 Fatores que influenciam na reatividade dos corretivos

A reatividade das partículas dos corretivos de acidez é determinada pela legislação brasileira (Nº35, de 4 de julho de 2006) unicamente por meio da análise granulométrica feita pelo método de peneiras classificadas pela Associação Brasileira de Normas

Técnicas – ABNT (Brasil, 2006). Todavia, calcários podem apresentar diferentes granulometrias e reatividades semelhantes, gerando impacto na recomendação de dose e efeito residual (Merlotto, 2024). Este autor aponta que a natureza química e geológica das rochas, bem como os efeitos da proporção entre carbonatos de cálcio e magnésio influenciam na solubilidade e reatividade dos corretivos. Além destes fatores é notória a influência do clima e do solo na ação dos neutralizantes.

A natureza química dos componentes que neutralizam a acidez se diferem quanto a origem das bases, que podem ser fracas ou fortes; bases fortes dão origem a constituintes de ação mais rápida e energética, ao passo que bases fracas originam materiais de ação mais lenta e menos energética (Alcarde, 2005). Este autor aponta que os carbonatos e silicatos são originados de bases fracas e os hidróxidos de bases fortes. A velocidade na reação do corretivo pode, portanto, sofrer influência do tipo de neutralizante.

No Brasil há uma grande variação quanto às condições climáticas de cada região, sendo que na porção norte encontra-se uma extensão de clima do tipo tropical, no interior do Nordeste uma aridez marcante e ao sul do país os climas subtropicais e temperados (Dubreuil *et al.*, 2018). Os níveis de precipitação, as médias de temperatura e a umidade relativa do ar podem ser bastante variáveis, de modo que há interferências na reatividade e eficiência na prática da calagem. Alcarde (2005) destacou que quanto maior for a temperatura e a umidade, maior será a reatividade, explicando o motivo de haver maior reatividade nas regiões de clima tropical do que nas regiões temperadas e frias.

Os corretivos de acidez podem apresentar diferentes reatividades quando aplicados em tipos de solos distintos, mesmo que possuam a mesma granulometria, fato este que demonstra a importância do tipo de solo na velocidade de neutralização da acidez e dos teores de elementos tóxicos. Este comportamento reflete a influência de fatores inerentes a determinado tipo de solo, incluindo o poder tampão (Gomes *et al.*, 1996). Estes pesquisadores apontam também que os teores de oxi-hidróxido de ferro e de alumínio podem atuar como capa ou película sobre as partículas do corretivo. O poder tampão do solo representa a resistência do solo em ter o seu valor de pH alterado e é influenciado pela protonação e desprotonação dos grupos ácidos da matéria orgânica, dos óxidos e hidróxidos; pela dissolução e precipitação dos carbonatos; pela troca iônica e devido à complexação ou não do alumínio da matéria orgânica (Nelson *et al.*, 2010). Estes atributos são bastante variáveis entre uma classe de solo e outra, de modo que, por apresentarem diferentes resistências, a velocidade das reações também será afetada.

A solubilidade e a natureza geológica das rochas que originam os materiais de correção são fatores que também afetam a reatividade, porém não são considerados no momento de determinar este parâmetro de qualidade dos corretivos. Para Merlotto (2024), calcários sedimentares parecem ser mais facilmente solubilizados, com maior velocidade de reação quando comparados a calcários metamórficos de granulometria similar. Soratto e Crusciol (2014) observaram que nos primeiros meses de um teste de incubação os calcários de origem sedimentar de granulometria mais grossa apresentaram maior capacidade de correção do solo que os calcários metamórficos. Pesquisadores apontam que a proporção entre os carbonatos de cálcio e magnésio também determinam de alguma maneira a solubilidade e reatividade do corretivo no solo, sendo os calcários dolomíticos menos solúveis que os calcíticos de igual granulometria (Merlotto, 2024).

2.6 Solubilidade de minerais em rochas sedimentares e metamórficas

As rochas sedimentares são formadas a partir de complexos processos de deposição, recebendo sedimentos de diversas origens. Sua composição inclui minerais de argila, quartzo, carbonatos, feldspatos, sulfetos, detritos biogênicos e matéria orgânica (Li *et al.*, 2025). O calcário e o dolomito são rochas sedimentares carbonatadas, constituídos pelos minerais calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$), respectivamente (Sampaio; Almeida, 2005).

As rochas metamórficas, por sua vez, surgem a partir de outro tipo de rocha, seja magmática, sedimentar ou metamórfica, após passarem pelo processo de metamorfismo. Altas temperaturas, altas pressões, fluidos quentes ricos em minerais ou a combinação desses fatores dão origem às rochas metamórficas (USGS, 2024). Os calcários de origem metamórfica são rochas que se originaram de outros tipos de rochas, principalmente por calcita e dolomita (Merlotto, 2024).

Em comparação com as rochas metamórficas, as rochas calcárias de natureza sedimentar apresentam elevada friabilidade, ou seja, possui maior facilidade de se fragmentar em partículas menores, influenciando positivamente na solubilidade dos corretivos formados a partir de materiais sedimentares (Kurihara *et al.*, 1999). O nível de cristalização também parece diferenciar os corretivos, já que os materiais de origem sedimentar possuem natureza menos cristalina do que os metamórficos, o baixo nível de cristalização aumenta a área superficial reativa, favorecendo a solubilização (Gomes *et al.*, 1996; Cazotti *et al.*, 2019).

Estudos com calcários sedimentares e metamórficos têm apontado que os corretivos sedimentares podem ser até duas vezes mais solúveis do que os metamórficos, além de reagir mais rapidamente no solo, mesmo que os valores de reatividade sejam inferiores aos dos corretivos metamórficos (Merlotto, 2024). Essa elevada eficiência do calcário sedimentar pode estar relacionada com a friabilidade das partículas, pois os torrões maiores são desagregados durante a homogeneização com o solo; estes grânulos reduzidos possuem maior superfície específica e, portanto, maior ação corretiva no solo (Kurihara *et al.*, 1999).

A origem geológica e a mineralogia dos corretivos exerce clara influência em sua solubilidade e velocidade de reação no solo. Deste modo, as avaliações que utilizam apenas o tamanho de partícula da rocha moída para calcular a reatividade do calcário pode promover uma avaliação incorreta da sua capacidade de neutralizar a acidez do solo (Soratto *et al.*, 2019).

REFERÊNCIAS

ALCARDE, J. C.; HANASIRO, J. **Metodologia Oficial de Análise de Corretivos de Acidez**. Porto Alegre, RS: Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola, 3 ed., 2016. Disponível em: <https://abracal.com.br/site/wp-content/uploads/2021/04/Cartilha-Metodologia-Analise-Corretivos-Acidez.pdf>. Acesso em: 23 out. 2024.

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: Características e interpretações técnicas**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 24 p, 2005. Disponível em: https://anda.org.br/wp-content/uploads/2019/03/boletim_06.pdf. Acesso em: 17 out. 2024.

ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. Avaliação química de corretivos de acidez para fins agrícolas: uma nova proposição. **Scientia Agricola**, v. 53, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90161996000200003>. Acesso em: 21 out. 2024.

ALVAREZ, V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. Acesso em: 18 out. 2024.

ALVES, S. R. V.; BERTI, M. P. S. Molibdênio no metabolismo e dinâmica vegetal: uma revisão. **Revista Agrotecnologia**, v. 13, n. 1, p. 50-63, 2022. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/article/view/12534/9088>. Acesso em: 16 out. 2024.

ANGELINE, G. C.; *et al.* Atlas de Solos de América Latina e do Caribe. **Comissão Europeia – Serviço de Publicações da União Europeia**, 176 p, 2015. Disponível em: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/LatinAmerica_Atlas/JRC_LAC_atlas_maps_PT_reduced.pdf. Acesso em: 27 set. 2024.

ANTWERPEN, R. van.; HEERDEN, P. D. R. van.; KEEPING, M. G.; TITSHALL, L. W.; JUMMAN, A.; TWEDDLE, P. B.; ANTWERPEN, T. van.; RAMOUTHAR, P. V.; CAMPBELL, P. L. A review of field management practices impacting root health in sugarcane. **Advances in Agronomy**, v. 173, p. 79-162, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.02.002>. Acesso em: 23 nov. 2024.

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 Ciências do Solo**, n. 33, p. 1755-1764, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600024>. Acesso em: 23 out. 2024.

BARROW, N. J.; HARTEMINK, A. E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. **Plant Soil**, v. 487, p. 21-37, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>. Acesso em: 14 out. 2024.

BELLINGIERI, P. A.; SOUZA, E. C. A.; ALCARDE, J. C.; SHIKASHO, H. W. Importância da reatividade do calcário sobre a produção e algumas características da

cultura da soja. **Scientia Agricola**, v. 49, n.1, p. 61-71, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90161992000400010>. Acesso em: 23 out. 2024.

BEZERRA, B. K. L.; *et al.* Estresse Mineral (Macronutrientes). In: BROETTO, F.; GOMES, E. R.; JOCA, T. A. C. **O Estresse das Plantas Teoria & Prática**. São Paulo, SP: Cultura Acadêmica, 2017. Disponível em: <http://www.santoandre.sp.gov.br/biblioteca/pesquisa/ebooks/390142.pdf>. Acesso em: 16 out. 2024.

BIAN, M.; ZHOU, M.; SUN, D.; LI, C. Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants. **The Crop Journal**, v. 1, n. 2, p. 91-104, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2013.08.002>. Acesso em: 27 set. 2024.

BRASIL. Instrução Normativa SDA nº 35, de 4 de julho de 2006. Dispõe sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília: DF, n. 132, p. 1-10, 12 jul. 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-correctivos.pdf/view>. Acesso em: 23 out. 2024.

CAZOTTI, M. M.; COSTA, L. M, da.; CECON, P. R. Calcário biogênico, sedimentar e metamórfico: caracterização comparativa na correção de solos. **Revista Ceres**, v. 66, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201966010009>. Acesso em: 5 jun. 2025.

CHAHARDOLI, A.; JALILIAN, F.; MEMARIANI, Z.; FARZAEI, M. H.; SHOKOOHINIA, Y. Analysis of organic acids. **Recent Advances in Natural Products Analysis**, p. 767-823, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00026-3>. Acesso em: 10 out. 2024.

CRESPO-MENDES, N.; LAURENT, A.; HAUSCHILD, M. Z. Effect fator of terrestrial acidification in Brazil for use in Life Cycle Impact Assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 1105-1117, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1560-7>. Acesso em: 27 set. 2024.

DING, Z.; REN, B.; CHEN, Y.; YANG, Q.; ZHANG, M. Chemical and Biological Response of Four Soil Types to Lime Application: An Incubation Study. **Agronomy**, v. 13, n. 2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020504>. Acesso em: 20 mai. 2025.

DORTZBACH, D.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C, DOS.; FONTANA, A.; SILVA NETO, E. D. Genesis and Classification of Soils from Subtropical Mountain Regions of Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 40, p. 1-15, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150503>. Acesso em: 27 set. 2024.

DU, L.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; WANG, Y.; ZHOU, C.; YANG, H.; ZHANG, W. Heterogeneous impact of soil acidification on crop yield reduction and its regulatory variables: A global meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 319, 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109643>. Acesso em: 20 mai. 2025.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; SANT'ANNA NETO, J. L. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confin**, n. 37, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confin.15738>. Acesso em: 23 out. 2024.

GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; RODRIGUES, W.; BOLETA, E. H. M.; FERNANDES, G. C. Silicon as an acidity corrective associated with *Azospirillum brasilense* to improve nitrogen management and wheat profitability. **Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 447-464, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2020v41n2p447>. Acesso em: 23 mai. 2025.

GARBOWSKI, T.; BAR-MICHALCZYK, D.; CHARAZINSKA, S.; GRABOWSKA-POLANOWSKA, B.; KOWALCZYK, A.; LOCHYNSKI, P. An overview of natural soil amendments in Agriculture. **Soil & Tillage Research**, v. 225, n. 105462, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105462>. Acesso em: 17 out. 2024.

GAZEY, C.; AZAM, G. Effects of soil Acidity. **Department of Primary Industries and Regional Development**. 2018. Disponível em: <https://www.agric.wa.gov.au/soil-acidity/effects-soil-acidity?page=0%2C2>. Acesso em: 14 out. 2024.

GOMES, M. A. F.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M, da.; MOURA FILHO, W. Influência de ferro e de alumínio amorfos do solo na reatividade de quatro corretivos de acidez. **Revista Ceres**, v. 43, n. 248, p. 444-453, 1996. Disponível em: <https://ojs.ceres.ufv.br/ceres/article/view/2356>. Acesso em: 24 out. 2024.

GOMES, M. A. F.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M, da.; MOURA FILHO, W. Qualidade de corretivos de acidez do solo e sua influência no processo de solubilização. **Revista Ceres**, v. 43, n. 249, p. 611-620, 1996. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/12757/1/1996APGomesQualidade3353.PDF>. Acesso em: 5 jun. 2025.

GONÇALVES, J. R. P.; MOREIRA, A.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, A. C.; BOAS, R. L. V. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, p.369-375, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.3659>. Acesso em: 23 out. 2024.

GUBIANI, E.; KAMINSKI, J.; SANTANNA, M. A.; BELLINASSO, R. J. S.; PICCIN, R.; TOLEDO, J. A. Método alternativo para a estimativa da acidez potencial “real” de solos. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Florianópolis, 2013. **Anais eletrônicos** [...] Florianópolis. Disponível em: <https://eventosolos.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/1447.pdf>. Acesso em: 18 out. 2024.

HALISKI, Adriano. **Acidez do solo e toxicidade do alumínio em sistema plantio direto de longa duração**. 2018. 144 f, Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Ponta Grossa, 2018. Disponível em: <https://tede2.uepg.br/jspui/bitstream/prefix/2767/1/Adriano%20Haliski.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2025.

KAMPRATH, E. J.; SMYTH, T. J. Liming. **Earth Systems and Environmental Sciences**, p. 350-358, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00225-3>. Acesso em: 21 out. 2024.

KOCJAN, A.; KWASNIEWSKA, J.; SZURMAN-ZUBRZYCKA, M. Understanding plant tolerance to aluminium: exploring mechanisms and perspectives. **Plant Soil**, v. 507, p. 195-219, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06745-0>. Acesso em: 23 mai. 2025.

KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; HERNANI, L. C.; SILVA, W. M. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcários sul-matogrossenses. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 8, p. 1443-1449, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000800017>. Acesso em: 5 jun. 2025.

LANNA, A. C.; FILIPPI, M. C. de.; FERREIRA, C. M.; NASCENTE, A. S. **Mitigação dos estresses abióticos na agricultura mediada pela interação de microrganismos e plantas**. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2021. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1136263/1/doc319.pdf>. Acesso em: 16 out. 2024.

LI, Y.; LI, Z.; ZHANG, J.; QIU, Z.; KONTAKIOTIS, G.; PENG, J.; WANG, Y. Editorial: Fine-grained sedimentary rocks: sedimentary processes, diagenesis, geochemistry and their relationship with critical geological events. **Frontiers in Earth Science**, v. 13, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1625168>. Acesso em: 5 jun. 2025.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R. de. Formação do Solo. *In*: LIMA, V.C.; LIMA, M.R. de.; FREITAS, M.V. de. **O solo no meio ambiente**. Paraná: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, p. 1-10, 2007. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/67899>. Acesso em: 27 set. 2024.

MAEDA, S.; KURIHARA, C. H.; HERNANI, L. C.; SILVA, W. M. **Estudo dos Materiais Calcários Usados como Corretivos da Acidez do Solo em Mato Grosso do Sul**. Dourados, MS: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – CPAO, 22p, 1996. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/38994/1/BP-1-96.pdf>. Acesso em: 21 out. 2024.

MAHMUD, M. S.; CHONG, K. P. Effects of Liming on Soil Properties and Its Roles in Increasing the Productivity and Profitability of the Oil Palm Industry in Malaysia. **Agriculture**, n. 12, v. 322, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture12030322>. Acesso em: 23 mai. 2025.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação da laranjeira**. São Paulo, SP: Ultrafertil, 1979. Acesso em: 18 out. 2024.

MANSYUR, N. I.; HANUDIN, E.; PURWANTO, B. H.; UTAMI, S. N. H. Morphological characteristics and classification of soils formed from acidic sedimentary rocks in North Kalimantan. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 393, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/393/1/012083>. Acesso em: 27 set. 2024.

MARTINS, C. R.; LOPES, W. A.; ANDRADE, J. B, de. Solubilidade das substâncias orgânicas. **Química Nova**, v. 36, n. 8, p. 1248-1255, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000800026>. Acesso em: 10 out. 2024.

MENEZES, A. A.; SOUZA JUNIOR, J. O, de.; SODRÉ, G. A.; SANTOS, J. A. G.; SOUZA, L. S. Avaliação de métodos para estimativas da necessidade de calagem em solos do estado da Bahia, Brasil. **Agrotrópica**, v. 31, n. 3, p. 197-204, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21757/0103-3816.2019v31n3p197-204>. Acesso em: 27 mai. 2025.

MERLOTTO, Gabriel Rodrigo. **Solubilidade e reatividade de calcários sedimentares e metamórficos**. 2024. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, IAC, Campinas, 2024. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstitutopostrgraduacao/repositorio/storage/teses_disseracoes/Gabriel_Rodrigo_Merlotto.pdf. Acesso em: 23 out. 2024.

MIOTTO, Alcione. **Calcários calcítico e dolomítico e alterações nos atributos de solos e plantas sob sistema de plantio direto**. 2009. 78 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, 2009. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/5488>. Acesso em: 20 out. 2024.

MOSLEY, L. M.; RENGASAMY, P.; FITZPATRICK, R. Soil pH: Techniques, challenges and insights from a global dataset. **European Journal of Soil Science**, v. 75, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.70021>. Acesso em: 20 mai. 2025.

NELSON, P. N.; SU, N. Soil pH buffering capacity: a descriptive function and its application to some acidic tropical soils. **Australian Journal of Soil Research**, n. 48, p. 201-207, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1071/SR09150>. Acesso em: 24 out. 2024.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 6, n. 1, 2004. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/viewFile/410/560>. Acesso em: 17 out. 2024.

OLIVEIRA, I. P, de.; COSTA, K. A. P.; SANTOS, K. J. G, dos.; MOREIRA, F. P. Considerações sobre a acidez dos solos de cerrado. **Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos**, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2005. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/220443/1/refmb-2005.3.pdf>. Acesso em: 14 out. 2024.

PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of Liming soil organic carbon stocks: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n. 202, p. 98-107, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.005>. Acesso em: 13 nov. 2024.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O. **Características de corretivos agrícolas**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 28 p, 2004. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61985/1/Doc37ACP2004.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024.

PULROLNIK, K. **Transformações do Carbono no Solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2010/31495/1/doc-264.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

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

RAIJ, B. van. Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície. *In*: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes**. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute, v. 1, 2009. Acesso em: 18 out. 2024.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; ZULLO, M. A. T. O método tampão SMP para determinação da necessidade de calagem de solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 38, n. 7, p. 57-69, 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051979000100007>. Acesso em: 18 out. 2024.

RAIJ, B. van.; SACCHETTO, M. T. D.; KUPPER, A. Estudo de materiais calcários usados como corretivos do solo no Estado de São Paulo. II – Composição química. **Bragantia**, v. 27, n. 37, p. 493-500, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051968000200019>. Acesso em: 21 out. 2024.

RAY, D.; BARUAH, P. M.; AGARWALA, N. Aluminium in tea plants: phytotoxicity, tolerance and mitigation. **Hazardous and Trace Materials in Soil and Plants**, p. 217-229, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91632-5.00018-5>. Acesso em: 13 nov. 2024.

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**, n. 39, p. 1723-1736, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20150036>. Acesso em: 17 out. 2024.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M, de. Calcário e Dolomito. *In*: LUZ, A. B.; LINS, F. A. D. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/674>. Acesso em: 5 jun. 2025.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. **Eficiência de calcário sedimentar com diferentes granulometrias na correção do solo e disponibilização de silício**. Relatório de pesquisa - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, 24 p, 2014. Disponível em: <https://www.calcarioguapirama.com.br/uploads/search/pesquisa-unesp-reactividade-calcario-sedimentar.pdf>. Acesso em: 24 out. 2024.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; VITTI, G. C. Reactivity of sedimentary and metamorphic limestones of different particle sizes under controlled conditions. **Communications in soil Science and Plant Analysis**, v. 50, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566920>. Acesso em: 18 mar. 2025.

SOUSA, D. M. G, de. **Bioma Cerrado: Tipos de solos, Latossolos**. Embrapa, 2021. Portal. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/solo/tipos-de-solo>. Acesso em: 20 mai. 2025.

SOUZA, J. L. B. S.; ANTONANGELO, J. A.; ZHANG, H.; REED, V.; FINCH, B.; ARNALL, B. Impact of long-term fertilization in no-till on the stratification of soil acidity and related parameters. **Soil and Tillage Research**, v. 228, n. 105624, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105624>. Acesso em: 02 out. 2024.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 6 ed, 2017. Acesso em: 21 out. 2024.

TEIXEIRA, W. G.; ÁLVAREZ V, V. H.; NEVES, J. C. L.; PAULUCIO, R. B. Evaluation of traditional methods for estimating lime requirement in Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbcs20200078>. Acesso em: 16 mai. 2025.

TOIVONEN, P. M. A.; HODGES, D. M. Abiotic Stress in Harvested Fruits and Vegetables. *In*: SHANKER, A. K.; VENKATESWARLU, B. **Abiotic stress in plants-mechanisms and adaptations**. Rijeka: InTech, 2011. Acesso em: 21 out. 2024.

TUBANA, B. S.; PAYE, W. S. Minerais no Ambiente do Solo. *In*: DATNOFF, L. E.; ELMER, W. H.; RODRIGUES, F. A. **Nutrição mineral e doença de planta**. Saint Paul, MN: The American Phytopathological Society, 2 ed, 2023. Acesso em: 21 out. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **What is Acid Rain?** 2024. Portal. Disponível em: <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>. Acesso em: 02 out. 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **What are metamorphic rocks?** 2024. Portal. Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-metamorphic-rocks>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ZHANG, S.; ZHU, Q.; VRIES, W, de.; ROS, G. H.; CHEN, X.; MUNEER, M. A.; ZHANG, F.; WU, L. Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields world-wide meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 345, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118531>. Acesso em: 23 mai. 2025.

CAPÍTULO I

DETERMINAÇÃO DE UM MÉTODO QUÍMICO PARA AVALIAR A REATIVIDADE DE CORRETIVOS DE ACIDEZ

RESUMO

A reatividade é um parâmetro físico cuja avaliação pode ser subestimada devido ao seu atual método para determinação, que envolve apenas a granulometria e despreza a solubilidade dos materiais corretivos. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi obter um método químico alternativo para estimar a reatividade de calcários considerando a solubilidade e granulometria dos corretivos de acidez. O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Uberlândia em um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com um esquema fatorial 5x5+1 e três repetições. Foram estudados cinco materiais para correção de acidez (Material 1 – 44,23% CaO e 7,68% MgO; Material 2 – 31,73% CaO e 20,26% MgO; Material 3 – 55,58% CaO e 1,84% MgO; Material 4 – 34,62% CaO e 23,79% MgO; Material 5 – 46,17% CaO e 13,44% MgO), cinco granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm) e o adicional, carbonato de cálcio (CaCO₃ P.A). O método proposto consistiu na adição de 1 g do corretivo em 100 mL de água, sob agitação constante para solubilização do material e um eletrodo para avaliação do pH. Por um período de 15 min adicionou-se uma gota de ácido clorídrico (HCl) puro a cada vez que o pH da solução atingia a 6; ao final do tempo foi contabilizado o volume total de HCl gasto por cada tratamento para manter o pH constante. O resultado foi comparado com a média obtida pelo tratamento controle, cuja reatividade foi considerada 100%. Os dados foram submetidos à análise de variância a 5% de significância utilizando o software estatístico R; posteriormente foram feitos teste de médias (Tukey), análise de regressão e teste de Dunnett para comparar o efeito dos tratamentos com a testemunha. De acordo com o método proposto, em uma mesma granulometria os corretivos apresentam diferentes reatividades. O material 3 (calcítico), apresentou maior reatividade (52,17%) na granulometria mais fina (<0,297 mm) quando comparado ao demais tratamentos. Os materiais de maior tamanho de partícula obtiveram menor solubilidade e sofreram menor influência da relação Ca:Mg; à medida que a granulometria do corretivo aumenta há uma redução significativa na reatividade dos materiais. O teste químico proposto é uma forma alternativa e complementar de estimar a reatividade, podendo ser aprimorado ao estudar materiais de diferentes origens geológicas, mineralogia, composição de neutralizantes e teores de cálcio e magnésio. Deve-se, portanto, aplicar os resultados obtidos neste ensaio no solo e em sistemas de cultivo para validação do método.

Palavras-chave: calagem; granulometria; solubilidade; relação Ca:Mg.

ABSTRACT

Reactivity is a physical parameter whose evaluation may be underestimated due to its current determination method, which considers only particle size distribution and disregards the solubility of corrective materials. Therefore, the objective of this study was to develop an alternative chemical method to estimate the reactivity of limestones by accounting for both solubility and particle size. The experiment was conducted at the Federal University of Uberlândia using a completely randomized design (CRD), in a 5×5+1 factorial scheme with three replications. Five acidity-correcting materials were evaluated (Material 1 – 44,23% CaO and 7,68% MgO; Material 2 – 31,73% CaO and 20,26% MgO; Material 3 – 55,58% CaO and 1,84% MgO; Material 4 – 34,62% CaO and 23,79% MgO; Material 5 – 46,17% CaO and 13,44% MgO), along with five particle size classes (<0,297; 0,297–0,500; 0,500–0,840; 0,840–1,000; and 1,000–1,700 mm), plus an additional treatment with pure calcium carbonate (analytical grade CaCO₃). The proposed method involved adding 1 g of the corrective material to 100 mL of water under constant stirring to promote dissolution, while monitoring the pH with an electrode. Over a 15-minute period, a drop of pure hydrochloric acid (HCl) was added each time the solution pH reached 6. At the end of the test, the total HCl volume required to maintain the pH was recorded for each treatment. Results were compared to the average value from the control treatment, whose reactivity was set at 100%. Data were subjected to analysis of variance at the 5% significance level using the R statistical software, followed by Tukey's test for mean comparison, regression analysis, and Dunnett's test to compare treatments with the control. According to the proposed method, different reactivities were observed among materials of the same particle size. Material 3 (calcitic) showed the highest reactivity (52,17%) at the finest particle size (<0,297 mm) compared to other treatments. Coarser materials showed lower solubility and were less influenced by the Ca:Mg ratio; as particle size increased, a significant decrease in reactivity was observed. The proposed chemical test represents an alternative and complementary approach to estimate reactivity and may be refined by evaluating materials of different geological origins, mineralogical characteristics, neutralizing compositions, and calcium and magnesium contents. The results obtained in this study should be applied to soil and cropping systems for method validation.

Keywords: Ca:Mg ratio; liming; particle size; solubility.

3 INTRODUÇÃO

A calagem é a prática responsável por aumentar o pH do solo, variável que está intimamente relacionada às propriedades químicas, físicas e biológicas. Os materiais corretivos fornecem cálcio, magnésio, aliviam a toxicidade do alumínio e estimulam a disponibilidade de nutrientes (Wenyika *et al.*, 2025). O calcário é um dos corretivos mais utilizados para o manejo de acidez dos solos, devido a sua abundância e facilidade de aquisição (Gayathri *et al.*, 2024; Gallo, 1954). Os materiais comercializados são classificados conforme o seu poder de neutralização (PN), reatividade (RE) e poder relativo de neutralização total (PRNT), sendo estes fatores determinantes para recomendação da calagem.

Os parâmetros de qualidade dos corretivos propostos pela legislação brasileira têm sido discutidos desde 1961, com atualizações em 1975, 1983, 1986 e 2006 (Wietholter, 2000; Brasil, 2006). Baseado no proposto a reatividade será de 20% para materiais que passam na peneira de 2 mm e ficam retidos na de 0,84 mm; de 60% para partículas que ficam entre 0,83 e 0,30 mm e de 100% para materiais cujas partículas passem completamente na peneira de 0,30 mm (Brasil, 2006; Soratto *et al.*, 2019).

A determinação correta dos parâmetros que influenciam na quantidade de calcário a ser aplicado é fundamental para o sucesso desta prática. Todavia, no que tange a reatividade dos corretivos, velocidade com que os materiais irão reagir no solo, diversas críticas vêm sendo apontadas quanto à exatidão e qualidade da metodologia utilizada para sua determinação. O atual método utilizado para determinar a reatividade é baseado no tamanho das partículas do corretivo, desprezando a natureza química e mineralogia dos materiais utilizados.

De acordo com Gallo (1954) os corretivos variam grandemente quanto à composição química, propriedades físico-químicas e características mineralógicas. A ação conjunta destes fatores irá influenciar na solubilidade dos corretivos, de modo que materiais com a mesma fração granulométrica podem apresentar diferentes reatividades (Gallo; Catani, 1954). A metodologia utilizada para avaliar a reatividade dos corretivos baseada no tamanho da partícula pode subestimar a capacidade dos corretivos em neutralizar a acidez dos solos, conferindo um equívoco na recomendação da calagem (Soratto *et al.*, 2019).

A composição mineralógica dos corretivos irá influenciar na cinética de dissolução e nos mecanismos de reação, há uma escassez de entendimento necessário

sobre a complexidade da dissolução dos minerais carbonáticos (Bibi *et al.*, 2025). Estudos apontam uma solubilidade mais elevada em calcários com altas concentrações de cálcio comparado aos dolomíticos de mesma finura e que materiais sedimentares se revelam mais solúveis do que os metamórficos de mesma composição química (Gallo; Catani, 1954).

Há uma carência de pesquisas no Brasil sobre o efeito da solubilidade dos corretivos de acidez na expressão da reatividade, de modo que o objetivo deste trabalho foi estudar este parâmetro com materiais de diferente composição química e granulometria, além de desenvolver uma metodologia que estime de forma mais exata a reatividade relativa destes corretivos quando comparado ao atual método utilizado pela legislação brasileira.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição experimental

A análise química para determinar a reatividade de corretivos de acidez foi desenvolvida no Laboratório de Fertilizantes (LAFER) que está situado na Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Umuarama. Os materiais para correção de acidez utilizados neste experimento foram obtidos em Coromandel – MG, Arcos – MG e Patos de Minas – MG. A coleta do material ocorreu em outubro de 2023 e após este processo os calcários foram peneirados utilizando peneiras de placas perfuradas com diferentes granulometrias em conformidade com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As peneiras separam o material em função de diferentes tamanhos de partículas, sendo que as aberturas utilizadas estão apresentadas na Tabela 1. Para auxiliar na separação foi utilizado um agitador de peneiras eletromagnético da marca Produtest (Figura 1 – A).

Tabela 1 – Abertura das peneiras utilizadas para separação física do calcário

Tyler Mesh	mm	Abertura em polegadas
<50	<0,297	<0,0165
50 - 35	0,297 - 0,500	0,0165 - 0,0197
35 - 20	0,500 - 0,840	0,0197 - 0,0331
20 - 18	0,840 - 1,000	0,0331 - 0,0394
18 - 12	1,000 - 1,700	0,0394 - 0,0661

Fonte: A autora.

Foram obtidos corretivos de acidez em cinco faixas granulométricas entre 1,7 e 1,0 mm, 1,0 e 0,84 mm, 0,84 e 0,5 mm, 0,5 e 0,297 mm e <0,297 mm que chegou ao fundo.

Após o peneiramento do material foi realizada a análise química dos diferentes calcários determinando os teores de óxido de cálcio (CaO), magnésio (MgO) e o poder de neutralização (PN).

O método de titulação com indicador foi adotado para estabelecer o PN, com o fundamento de neutralizar uma amostra do corretivo com um volume conhecido de ácido. De acordo com Vieira e Silva (2009), transferiu-se um grama de calcário para um

erlenmeyer de 250 mL; em seguida foi adicionado 50 mL da solução de ácido clorídrico (HCl) 0,5 mol L⁻¹, sendo essa solução colocada em uma chapa aquecedora até ferver por cinco minutos (Figura 1 – B). Após o resfriamento a solução foi transferida para um balão volumétrico de 100 mL completando o volume com água destilada e deixada em repouso para decantação (Figura 1 – C). Posteriormente foi pipetado 50 mL da solução e transferido para um erlenmeyer de 125 mL, adicionando-se três gotas do indicador fenolftaleína para titulação com hidróxido de sódio (NaOH) 0,25 mol L⁻¹; determinou-se o volume gasto (V) de NaOH até o aparecimento de uma cor levemente rosada da solução. O poder de neutralização foi calculado pela expressão sugerida por Santos *et al.* (2009), (Equação 1).

Equação (1):

$$PN = 10(25M_1 - V_2 * M_2) / G$$

Onde:

M₁ = concentração da solução de HCl (mol L⁻¹).

V₂ = volume (mL) gasto da solução de NaOH.

M₂ = concentração da solução de NaOH (mol L⁻¹).

G = massa (g) da amostra de calcário.

Figura 1 – Separação granulométrica e análise química dos corretivos



Legenda: A – Processo de separação granulométrica. B – Aliquotas após aquecimento em chapa aquecedora. C – Amostras no processo de decantação para determinação do poder de neutralização.

Fonte: A autora.

Para determinar os teores de óxido de cálcio e óxido de magnésio pesou-se 0,5 g da amostra dos corretivos e ao colocar em um erlenmeyer foram acrescentadas 20 mL de ácido clorídrico (HCl). Essa solução foi colocada em uma chapa aquecedora (Tecnal ®,

modelo TE-038), com ajuste de temperatura até ferver por um período de 10 min. Posteriormente ao resfriamento, transferiu-se o conteúdo para um balão volumétrico de 100 mL e após este processo a solução ficou decantando por 24 h. Uma vez que ocorreu a decantação pipetou-se 1 mL da solução para um balão volumétrico de 50 mL, nesse também foi adicionado 2,5 mL de óxido de lantânio a 5%. Após esse procedimento obteve-se a leitura dos teores de Ca e Mg por meio de um espectrofotômetro de absorção atômica previamente calibrado com concentrações conhecidas destes nutrientes.

Nas Tabelas 2 e 3 encontram-se os dados referentes às propriedades químicas dos materiais utilizados neste experimento, as análises foram feitas em triplicatas e o resultado exposto é referente a média de todas as avaliações.

Tabela 2 – Poder de neutralização dos corretivos de acidez utilizados no experimento em função da fração granulométrica

Corretivo de acidez	Poder de neutralização (%)				
	<0,297 (mm)	0,297 - 0,500 (mm)	0,500 - 0,840 (mm)	0,840 - 1,000 (mm)	1,000 - 1,700 (mm)
Material 1	88,46	83,14	79,62	79,30	78,42
Material 2	87,48	78,43	66,94	50,92	33,74
Material 3	99,61	100,24	97,91	98,83	96,80
Material 4	104,28	103,90	105,02	105,37	102,32
Material 5	102,97	106,21	103,31	104,08	101,92

Fonte: A autora.

Tabela 3 – Teores de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) obtidos em função dos diferentes materiais utilizados e sua classificação quanto aos teores de Ca e Mg

Corretivo de acidez	CaO (%)	MgO(%)	Relação Ca:Mg	Classificação
Material 1	44,23	7,68	5,75:1,00	Dolomítico
Material 2	31,73	20,26	1,57:1,00	Dolomítico
Material 3	55,58	1,84	30,21:1,00	Calcítico
Material 4	34,62	23,79	1,45:1,00	Dolomítico
Material 5	46,17	13,44	3,43:1,00	Dolomítico

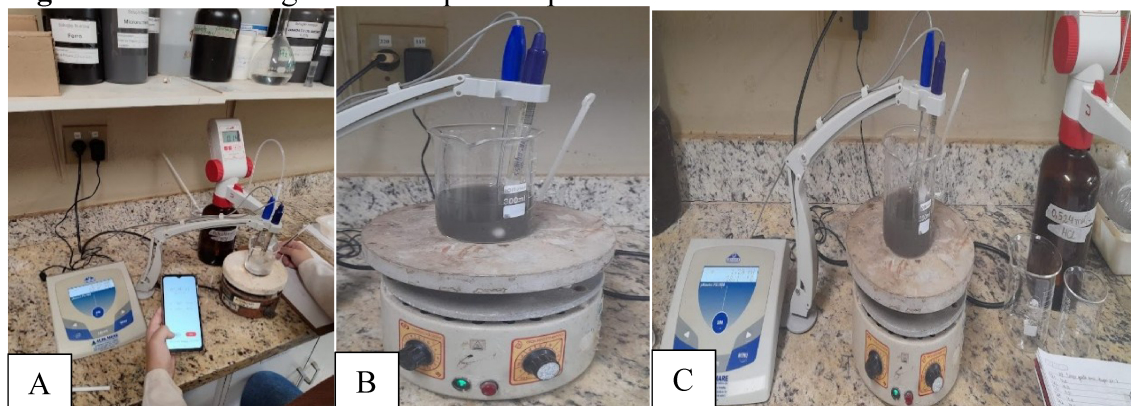
Fonte: A autora.

4.2 Metodologia para determinação da reatividade dos corretivos

Finalizada a análise dos materiais iniciou-se os testes para desenvolvimento do método de determinação da reatividade. Os tratamentos utilizados foram cinco materiais para correção de acidez com diferentes teores de CaO e MgO (Tabela 3) e as cinco granulometrias ($<0,297$; $0,297-0,500$; $0,500-0,840$; $0,840-1,000$ e $1,000-1,700$ mm), sendo utilizado o carbonato de cálcio (CaCO_3 P.A.) como tratamento controle resultando no esquema fatorial duplo com um adicional $5 \times 5 + 1$. A distribuição dos tratamentos foi feita em um delineamento inteiramente casualizado (DIC) com três repetições.

O método desenvolvido (Figura 2) consiste na adição de 1 g do corretivo em um béquer de 300 mL; posteriormente, acrescenta-se 100 mL de água destilada. O béquer deve ser colocado em um agitador magnético e dentro da solução, simultaneamente à agitação, deve ser instalado o eletrodo de um pHmetro para monitoramento constante do pH. Ao iniciar a agitação da solução com corretivo e água destilada, deve-se com o auxílio de uma bureta fazer a adição de ácido clorídrico (HCl) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a fim de manter o pH da solução sempre 6 (valor previamente estabelecido). O volume gasto do ácido no período de 15 minutos para manter o pH no valor determinado deve ser anotado.

Figura 2 – Metodologia do teste químico para determinar a reatividade do calcário



Legenda: A – Avaliação da alteração do pH em função do tempo. B – Agitador magnético com a solução avaliada. C – Equipamentos utilizados na metodologia da avaliação de reatividade.

Fonte: A autora.

4.3 Análise estatística

Os dados obtidos neste experimento foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos (Lilliefors, Kolmogorov-Smirnov) a 1% e homogeneidade de variância (Levene Test) a 5%. Utilizou-se o software R versão 4.4.3 para análise de variância ($\alpha =$

0,05) e teste de médias (Tukey a 5%). Por meio do R versão 4.4.3 também foi executado o teste de Dunnett ($\alpha = 0,05$) para comparar os tratamentos com a testemunha (controle). Para avaliar a correlação entre granulometria e o volume de HCl consumido pelos corretivos, foi ajustado aos dados um modelo de regressão não linear do tipo exponencial deslocado, descrito pela (Equação 2):

Equação (2):

$$Y = a + b \cdot e^{-cx}$$

Onde:

Y= volume de HCl (mL).

X= granulometria (mm).

a, b e c= parâmetros do modelo.

Os ajustes foram realizados utilizando o método dos mínimos quadrados não lineares (*Nonlinear Least Squares – NLS*), com uso da linguagem Python por meio da função *curve_fit* do pacote *scipy.optimize*. Todos os resultados foram analisados considerando a adequação do modelo em descrever o comportamento dos dados, observando-se boa aderência por meio da inspeção visual dos resíduos e da ausência de padrões sistemáticos que indicassem falta de ajuste.

O parâmetro *a* reflete o consumo mínimo de HCl para partículas muito grandes, sugerindo a reatividade residual do material. O parâmetro *b* expressa o potencial máximo de reatividade associado a granulometria, enquanto *c* indica a rapidez com que a reatividade decresce com o aumento do tamanho das partículas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após análise de variância dos dados observou-se que houve interação significativa entre os fatores de estudo, corretivos de acidez (material) e granulometria a 0,01 de significância para a variável volume de ácido clorídrico (HCl) gasto em mL.

Na faixa granulométrica $<0,297$ mm os tratamentos com o material 3 (55,58% de CaO e 1,84% de MgO) consumiram maior quantidade de HCl, com média de 5,08 mL; as unidades experimentais com os materiais 5 (46,17% de CaO e 13,44% de MgO), 4 (34,62% de CaO e 23,79% de MgO) e 1 (44,23% de CaO e 7,68% de MgO) obtiveram médias inferiores às parcelas com o material 3 e superiores às parcelas com o material 2 (31,73% de CaO e 20,26% de MgO), que apresentou menor volume de ácido gasto (0,8633 mL) (Tabela 4). A alta relação Ca:Mg combinada à granulometria mais fina pode influenciar no aumento da disponibilidade de cálcio e na solubilidade do corretivo (Merlotto, 2024). O material 3 (calcítico) apresentou maior relação Ca:Mg (30,21), o que explica sua maior reatividade (52,17%) quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 5). A solubilidade dos materiais em água é influenciada por sua estrutura e composição, de modo que os calcários calcíticos são menos estáveis e mais solúveis em água do que os materiais dolomíticos (Gallo; Catani, 1954). Para a faixa granulométrica de 0,297-0,500 mm, as parcelas com os materiais 1 e 5 apresentaram médias semelhantes (0,756 mL e 0,733 mL, respectivamente) e superiores às com os materiais 2, 3 e 4 (0,446; 0,446; 0,280 mL, nesta ordem), o material 4 foi o que proporcionou menor quantidade de ácido quando comparado aos demais, sendo este o que possui menor relação Ca/Mg (1,45) e maior porcentagem de MgO (23,79%) (Tabela 4). Para Merlotto (2024), o aumento do teor de magnésio reduz a solubilidade do corretivo, o que pode ser justificado com base em seus produtos de solubilidade (Kps). A calcita, principal mineral do calcário calcítico, apresenta maior Kps em comparação à dolomita, constituinte do calcário dolomítico, essa diferença implica em maior liberação de íons em solução e, consequentemente, maior solubilidade e reatividade (Lindsay, 1979; Sposito, 2008). Na fração de 0,500-0,840 mm as unidades experimentais com o material 4 apresentaram menor média (0,1466 mL) de volume gasto de HCl, sendo o tratamento que reagiu menos quando comparado aos demais materiais nesta faixa granulométrica. No intervalo de 0,840-1,000 mm o uso do material 4 se equiparou aos materiais 1 e 3 e em 1,000-1,700 mm se equiparou com os materiais 3 e 5. Nessas duas granulometrias o uso material 4 resultou em menor volume de ácido comparado ao material 2, que se assemelhou ao uso dos materiais 1, 3 e 5 (Tabela

4). Nas frações mais grosseiras ocorreu menor solubilização dos materiais, devido a menor superfície de contato entre o material e a solução, de forma que não foi possível observar a influência da relação entre os teores de cálcio e magnésio dos corretivos de acidez. De acordo com Gallo e Catani (1954), o aumento do teor de Mg geralmente manifesta-se por uma diminuição de solubilidade do corretivo, todavia, essa diferença é mais sensível para materiais de maior granulometria.

Tabela 4 – Desdobramento da variável volume gasto de ácido clorídrico – HCl (mL) em função do fator materiais de correção de acidez nos níveis de granulometria (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 1,000; 1,700mm). Uberlândia - MG

VOLUME GASTO DE ÁCIDO CLORÍDRICO - HCl (mL)**					
Granulometria	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
<0,297	*1,6733c	*0,8633e	*5,0800a	*1,3266d	*2,7733b
0,297-0,500	*0,7566a	*0,4466b	*0,4666b	*0,2800c	*0,7333a
0,500-0,840	*0,3733a	*0,3533a	*0,3833a	*0,1466b	*0,4600a
0,840-1,000	*0,2533ab	*0,3666a	*0,2500ab	*0,1566b	*0,2900a
1,000-1,700	*0,2800a	*0,2600a	*0,1900ab	*0,1300b	*0,1866ab
CaCO₃ P.A	9,7366 mL				
CV(%)	6,14%				

**significativo a 1% pelo teste F. As médias seguidas pela mesma letra na linha não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. *significativo pelo teste de Dunnett. CV (%) - Coeficiente de variação. Dados transformados pela \sqrt{X} .

Tabela 5 – Reatividade dos corretivos em função das diferentes granulometrias estudadas comparadas ao padrão (CaCO₃ P.A)

REATIVIDADE DOS MATERIAIS (%)					
Granulometria	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
<0,297	17,19	8,87	52,17	13,62	28,48
0,297-0,500	7,77	4,59	4,79	2,88	7,53
0,500-0,840	3,83	3,63	3,94	1,51	4,72
0,840-1,000	2,60	3,77	2,57	1,61	2,98
1,000-1,700	2,88	2,67	1,95	1,34	1,92
CaCO₃ P.A	100%				

Fonte: A autora.

A partir do teste de Dunnett observa-se que o tratamento controle que consiste no uso do padrão em carbonato de cálcio com qualidade de pureza analítica (CaCO₃ – P.A) se diferiu significativamente a todos os outros tratamentos, com média de volume gasto de HCl superior, sendo de 9,7366 mL (Tabela 4). Esse valor foi utilizado como referência para estimar a reatividade dos demais corretivos em função da granulometria, sendo a reatividade do CaCO₃ P.A padronizada como 100% (Tabela 5).

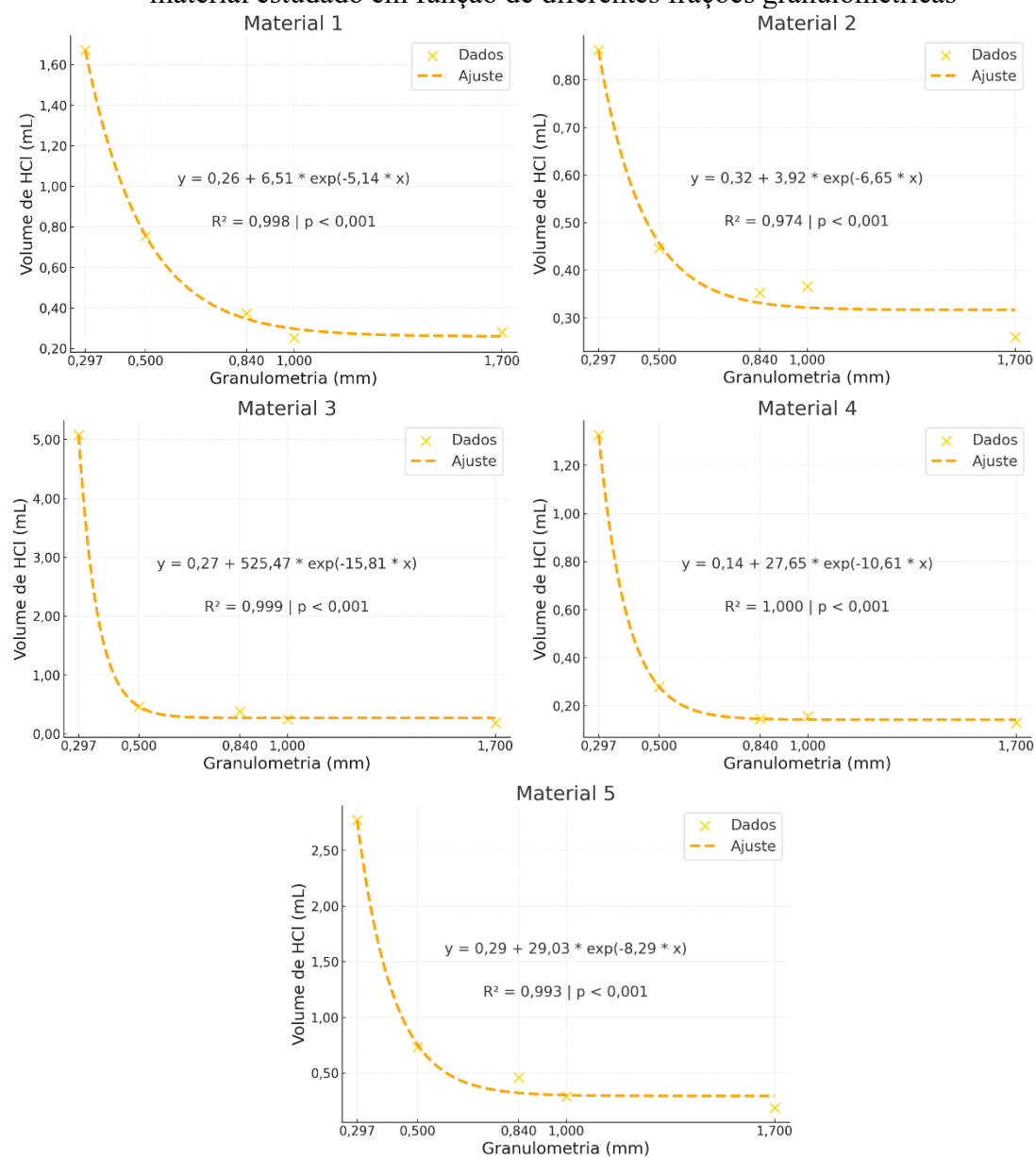
O material 3 (55,58% de CaO e 7,68% de MgO), com relação Ca:Mg de 30,21 foi o mais reativo, com reatividade de 52,17% na fração <0,297 mm. A menor reatividade,

por sua vez, foi de 1,34% para o material 4 (34,62% de CaO e 23,79% de MgO) na granulometria de 1,000-1,700 mm. A elevada solubilidade de calcários com alta concentração de cálcio (calcíticos) nas frações mais finas também foi observada por Gallo e Catani (1954), quando comparado a materiais dolomíticos. Ao avaliar o calcário calcítico e dolomítico no cultivo de soja Bellingieri *et al.* (1992) observaram que o calcítico apresentou em um primeiro ano de plantio maior reatividade do que o dolomítico, com melhores efeitos para granulometrias mais finas. A cinética de dissolução da dolomita possui taxa de reação relativamente lenta e é mais complexa comparado a calcita e magnesita (Bibi, 2025).

Para representar o volume de ácido clorídrico (HCl) gasto a fim de manter o pH 6, em função da granulometria (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm), foram feitos gráficos de regressão (Figura 3). É possível observar que para todos os materiais o maior volume foi expresso nas granulometrias mais finas; à medida que se aumenta o tamanho das partículas há uma redução no gasto de HCl. O maior volume de ácido gasto está diretamente relacionado com maior reatividade, haja vista que quanto mais os corretivos reagem em água, maior era a adição do ácido a fim de manter o pH 6. Este resultado corrobora com a afirmativa de que a finura do corretivo tem uma influência significativa na sua capacidade de reagir no solo, já que a dissolução é influenciada pela área de superfície; quanto maior a superfície de contato por unidade de massa, mais rápido será a dissolução e neutralização da acidez (Jones; Mallarino, 2018).

Os resultados obtidos neste experimento devem ser validados a partir da aplicação dos tratamentos no solo e em sistemas de plantio. Os efeitos das diferentes reatividades devem ser observados por meio da reação dos materiais nos solos e do desenvolvimento das culturas. Ademais, para o aperfeiçoamento do método, materiais com diferentes origens geológicas, composição química e teor de neutralizantes devem ser estudados, a fim de aumentar a eficiência e qualidade do modelo proposto.

Figura 3 – Volume de ácido clorídrico (HCl – mL) gasto para manter o pH 6 para cada material estudado em função de diferentes frações granulométricas



Fonte: A autora.

6 CONCLUSÃO

O teste químico em água é um método alternativo para estimar a reatividade e pode complementar o atual método de peneiras utilizado pelo MAPA; deve-se, no entanto, testar os resultados obtidos neste ensaio diretamente no solo e em sistemas de cultivo. Para fração granulométrica mais fina ($<0,297$ mm) o material 3 (55,58% CaO e 1,84% MgO), com maior relação Ca:Mg, apresentou maior reatividade. À medida que aumenta o tamanho das partículas dos corretivos há uma redução no volume gasto de HCl para neutralizar a solução, o que corresponde a menor reatividade. Não houve forte influência das concentrações de cálcio e magnésio na reatividade dos materiais nas partículas mais grossas.

Comparado ao atual método padronizado pela legislação brasileira para estimar a reatividade dos corretivos de acidez, esse experimento demonstrou que materiais de mesma granulometria podem apresentar diferentes reatividades, de modo que outros parâmetros devem ser considerados para essa avaliação, dentre eles a solubilidade. Uma avaliação mais completa da reatividade dos corretivos resulta em maior exatidão na recomendação da calagem.

REFERÊNCIAS

- BELLINGIERI, P. A.; SOUZA, E. C. A.; ALCARDE, J. C.; SHIKASHO, H. W. Importância da reatividade do calcário sobre a produção e algumas características da cultura da soja. **Scientia Agricola**, v. 49, n. 1, p. 61-71, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90161992000400010>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- BELLINGIERI, P. A.; ALCARDE, J. C.; SOUZA, E. C. A. Reatividade de Calcários agrícolas e a relação entre os teores de cálcio e magnésio. **An. Esc. Super. Agric. Luiz de Queiroz**, v. 45 (parte 2), p. 499-515, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0071-12761988000100032>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- BIBI, I.; AMIN, A.; HAESE, R. R.; NIAZI, N. K. Unraveling dolomite dissolution stoichiometry in circumneutral to alkaline pH environments. **Acta Geochim**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11631-025-00758-x>. Acesso em: 28 mai. 2025.
- BRASIL. Instrução Normativa SDA nº 35, de 4 de julho de 2006. Dispõe sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília: DF, n. 132, p. 1-10, 12 jul. 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf/view>. Acesso em: 23 out. 2024.
- GALLO, J. R. Estudo da solubilidade, em solução de ácido acético a 1%, de alguns materiais calcários de grau de finura comercial. **Bragantia**, v. 13, n. 10. 1954. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051954000100010>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- GALLO, J. R.; CATANI, R. A. Solubilidade de alguns tipos de calcários. **Bragantia**, v. 13, n. 5, 1954. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/S7YjzNTgp7Q88j5ppsy7m4c/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- GAYATHRI, P.; JOSE, N.; SURENDRAN, M.; JOSEPH, C. Ameliorants for the Management of Soil Acidity – A Review. **Society for Advancement of Rice Research**, v. 17, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.58297/EBQD3473>. Acesso em: 28 mai. 2025.
- JONES, J. D.; MALLARINO, A. P. Influence of Source and Particle Size on Agricultural Limestone Efficiency at Increasing Soil pH. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 1, p. 271-282, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0207>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979. Acesso em: 20 jun. 2025.
- MERLOTTO, Gabriel Rodrigo. **Solubilidade e reatividade de calcários sedimentares e metamórficos**. 2024. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, IAC, Campinas, 2024. Disponível em:

https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_disser_tacoes/Gabriel_Rodrigo_Merlotto.pdf. Acesso em: 23 out. 2024.

RAVAZZI, Priscilla Almozara. **Teste biológico para detectar barreira química em amostras de solos ácidos**. 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) – Instituto Agrônomo de Campinas, IAC, Campinas, 2009. Disponível em:

https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_disser_tacoes/pb00028.pdf. Acesso em: 18 mar. 2025.

SANTOS, A. D, dos; *et al.* **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 343. 2009. Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>. Acesso em: 15 set. 2024.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; VITTI, G. C. Reactivity of sedimentary and metamorphic limestones of different particle sizes under controlled conditions. **Communications in soil Science and Plant Analysis**, v. 50, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566920>. Acesso em: 18 mar. 2025.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2008. Acesso em: 20 jun. 2025.

VIEIRA, W.; SILVA, F. C, da. Análise de fertilizantes minerais, organominerais e corretivos. In: SANTOS, A. D, dos; *et al.* **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 343. 2009. Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>. Acesso em: 15 set. 2024.

WENYIKA, P.; ENESI, R. O.; GORIM, L. Y.; DYCK, M. Effects of liming on soil biota and related processes in agroecosystems: a review. **Discover Soil**, v. 2, n. 37, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00063-2>. Acesso em: 28 mai. 2025.

WIETHÖLTER, S. **Calagem no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 104p. (Embrapa Trigo. Documentos, 22). ISSN 1516-5582. 2000. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/820412/1/CNPTDOC.2200.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2025.

CAPÍTULO II

INFLUÊNCIA DE CORRETIVOS DE ACIDEZ EM DIFERENTES FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS EM COMPONENTES DE ACIDEZ E NOS TEORES DE CÁLCIO E MAGNÉSIO DO SOLO

RESUMO

A calagem é a prática responsável por neutralizar a acidez dos solos e de elevar os teores de cálcio e magnésio. A velocidade da reação dos corretivos nos solos é conhecida como reatividade, atributo determinado em função do tamanho das partículas dos materiais. Sabe-se, no entanto, que outros fatores podem interferir na reatividade dos corretivos, dentre eles a solubilidade de cada material. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes corretivos e granulometrias na melhoria dos atributos químicos do solo. O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Uberlândia em um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com um esquema fatorial triplo ($5 \times 5 \times 3$) e quatro repetições. Foram estudados cinco materiais para correção de acidez (Material 1 – 44,23% CaO e 7,68% MgO; Material 2 – 31,73% CaO e 20,26% MgO; Material 3 – 55,58% CaO e 1,84% MgO; Material 4 – 34,62% CaO e 23,79% MgO e Material 5 – 46,17% CaO e 13,44% MgO), cinco granulometrias ($<0,297$; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm) e três tempos de incubação (30, 90 e 120 dias). A unidade experimental apresentou 300 g de solo; a quantidade de calcário aplicada foi equivalente a $1,89 \text{ ton ha}^{-1}$, considerando o poder de neutralização de cada material; a umidade do solo foi mantida na capacidade de campo. Aos 30, 90 e 120 dias foram coletadas amostras de cada tratamento para avaliação de pH em H_2O , pH em CaCl_2 , acidez potencial (H^+Al), teores de cálcio e magnésio. Os dados foram submetidos à análise de variância a 5% de significância; quando diferenças significativas foram detectadas pelo teste F, as médias foram comparadas utilizando teste de Tukey ($p\text{-valor} < 0,05$). Não houve interação tripla significativa entre os fatores de estudo, mas dupla entre material e granulometria para pH em H_2O , pH em CaCl_2 , acidez potencial e teor de Mg^{2+} ; e entre granulometria e tempo para pH em H_2O . De forma geral, todos os materiais estudados promoveram maior valor de pH em água, pH em cloreto de cálcio e dos teores de cálcio e magnésio quando utilizada a granulometria mais fina ($<0,297 \text{ mm}$). Em uma mesma granulometria, os materiais apresentaram diferentes comportamentos na elevação do pH em água; para o pH em CaCl_2 a diferença entre os materiais foi observada apenas na fração $<0,297 \text{ mm}$. A redução da acidez potencial (H^+Al) e aumento do pH em CaCl_2 ocorreu após 90 dias de incubação. O maior teor de Ca^{2+} foi identificado aos 120 dias, ao passo que os teores de Mg^{2+} estabilizaram após 30 dias de incubação. A elevação dos teores de Ca e Mg do solo foi coerente com a concentração destes elementos nos corretivos utilizados. Conclui-se que a granulometria é um fator de relevância na avaliação da reatividade dos corretivos de acidez, todavia, outros parâmetros como a solubilidade da rocha, composição química e teores de Ca e Mg podem influenciar na velocidade de ação dos corretivos.

Palavras-chave: calagem; granulometria; incubação; solubilidade.

ABSTRACT

Liming is the practice responsible for neutralizing soil acidity and increasing calcium and magnesium levels. The rate at which liming materials react in the soil is known as reactivity, a property traditionally determined based on particle size. However, it is known that other factors may influence the reactivity of soil amendments, such as the solubility of each material. Therefore, this study aimed to evaluate different liming materials and particle sizes in improving soil chemical attributes. The experiment was conducted at the Federal University of Uberlândia in a completely randomized design (CRD), in a triple factorial scheme ($5 \times 5 \times 3$) with four replications. Five acidity-correcting materials were tested (Material 1 – 44,23% CaO and 7,68% MgO; Material 2 – 31,73% CaO and 20,26% MgO; Material 3 – 55,58% CaO and 1,84% MgO; Material 4 – 34,62% CaO and 23,79% MgO; Material 5 – 46,17% CaO and 13,44% MgO), five particle size ranges ($<0,297$; $0,297$ – $0,500$; $0,500$ – $0,840$; $0,840$ – $1,000$; and $1,000$ – $1,700$ mm), and three incubation periods (30, 90, and 120 days). Each experimental unit consisted of 300 g of soil; the applied lime amount was equivalent to $1,89 \text{ ton ha}^{-1}$, adjusted according to the neutralizing value of each material; soil moisture was maintained at field capacity. At 30, 90 and 120 days, samples were collected to determine pH in water, pH in CaCl_2 , potential acidity (H^+/Al), and calcium and magnesium contents. Data were subjected to analysis of variance at a 5% significance level. When significant differences were detected by the F-test, means were compared using Tukey's test ($p\text{-value} < 0,05$). No significant triple interaction was observed, but significant dual interactions were found between material and particle size for pH in H_2O , pH in CaCl_2 , potential acidity, and Mg^{2+} content, and between particle size and incubation time for pH in H_2O . Overall, all materials increased pH in water, pH in calcium chloride, and calcium and magnesium contents when applied in the finest particle size fraction ($<0,297$ mm). At the same particle size, materials differed in their effect on pH in water; for pH in CaCl_2 , differences between materials were observed only in the $<0,297$ mm fraction. The reduction in potential acidity (H^+/Al) and the increase in pH in CaCl_2 occurred after 90 days of incubation. The highest Ca^{2+} levels were observed after 120 days, while Mg^{2+} levels stabilized after 30 days. The increase in soil Ca and Mg levels was consistent with the concentrations of these elements in the applied materials. It is concluded that particle size is a relevant factor in evaluating the reactivity of soil amendments; however, other parameters such as rock solubility, chemical composition, and Ca and Mg contents may also influence the reaction rate of liming materials.

Keywords: incubation; liming; particle size; solubility.

7 INTRODUÇÃO

As propriedades químicas dos solos são diretamente influenciadas pelo pH da solução. A escala de pH mensura a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma determinada substância, solos com $\text{pH} < 7$ são considerados ácidos e estão distribuídos em todo o mundo (Shaaban, 2024). Os solos ácidos apresentam maior teor de H^+ e Al^{3+} , que substituem os cátions: potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), sódio (Na^+) e magnésio (Mg^{2+}) (Agegnehu *et al.*, 2021).

A calagem é a prática realizada para corrigir os efeitos da acidez, elevando o valor do pH do solo através da neutralização do H^+ e Al^{3+} e fornecendo Ca^{2+} e Mg^{2+} (Maraschin *et al.*, 2020). O calcário, insumo utilizado como corretivo de acidez, apresenta baixa solubilidade e a velocidade de sua reação no solo é denominada reatividade. As taxas de reatividade representam a porcentagem de corretivo que irá reagir no solo em um período de três meses, e são determinadas pela legislação brasileira em função do grau de finura dos materiais.

Os critérios para estabelecer a reatividade são baseados na porcentagem de material passante nas peneiras ABNT nº 10, 20 e 50. Materiais retidos na peneira ABNT nº 10 possuem reatividade zero; a reatividade será de 20% para fração que passa na peneira ABNT nº 10 e fica retida na ABNT nº 20; a fração que passa na peneira ABNT nº 20 e fica retida na ABNT nº 50 possui reatividade de 60%; a reatividade de 100% será dada a fração que passar na peneira ABNT nº 50 (Brasil, 2006).

Sabe-se, no entanto, que a velocidade da reação dos corretivos no solo pode ser influenciada por diversos fatores, dentre eles a solubilidade dos materiais, composição mineralógica, origem geológica da rocha, proporção entre cálcio e magnésio, tipo de solo e pelo clima (Merlotto, 2024; Alcarde, 2005). Estes fatores não são levados em consideração pela legislação atual de corretivos de acidez no Brasil, de modo que ela pode apresentar uma avaliação incompleta da reatividade dos corretivos comerciais (Merlotto, 2024).

A determinação incorreta da reatividade pode induzir a erros na recomendação da calagem. Em casos de subdosagem a calagem pode ser ineficiente para elevar o pH do solo ao valor desejado, neutralizar o efeito de elementos tóxicos e elevar os teores de Ca e Mg, restringindo o melhor condicionamento químico do solo (Araújo, 2022). Já a superdosagem pode resultar em desbalanço nutricional, toxicidade por micronutrientes ou trazer prejuízos econômicos.

Deste modo, o objetivo deste experimento foi avaliar o efeito de diferentes corretivos de acidez e granulometrias nos componentes de acidez e teores de Ca e Mg em um solo incubado por 120 dias sob condições ambientais controladas. Além de verificar a velocidade da reação dos materiais estudados (reatividade) e o seu efeito residual durante o período de incubação.

8 MATERIAL E MÉTODOS

8.1 Descrição experimental

O ensaio foi conduzido entre fevereiro e junho de 2024 no Laboratório de Fertilizantes (LAFER) que está situado na Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Umuarama. O solo utilizado para o desenvolvimento deste experimento é classificado como Latossolo Vermelho Ácrico típico e foi coletado na Universidade Federal de Uberlândia *Campus* Glória latitude -18.940655 e longitude -48.214724. Após a coleta, o solo foi peneirado utilizando peneira de 2 mm. Foi realizada a análise química das amostras no Laboratório de Análise de Solos e Calcários (LABAS) a fim de obter dados sobre a fertilidade do solo utilizado e realizar o cálculo para a calagem (Tabela 6).

Tabela 6 – Caracterização química do solo utilizado no teste de incubação. Uberlândia-MG

pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m
água	--mg dm ⁻³ --		-----cmol _c dm ⁻³ -----							-----%-----	
5,8	1,27	11,20	1,02	0,24	0,00	1,90	1,28	1,28	3,18	40,29	0,00

pH: água; P: Mehlich⁻¹; K: Mehlich⁻¹; Ca²⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; Mg²⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; Al³⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: capacidade de troca catiônica efetiva; T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio.

Fonte: A autora.

Com base na caracterização química dos solos, foi realizado o cálculo para calagem utilizando o método de elevação da saturação por bases a fim de elevar a saturação por bases (V%) a 100%. A necessidade de calagem foi de 1,89 t ha⁻¹, sendo este valor corrigido conforme o poder de neutralização de cada tratamento e para a quantidade de solo utilizada, 300 g (Tabela 7).

Tabela 7 – Quantidade de corretivo aplicado por parcela

CALCÁRIO (g parcela ⁻¹)					
Granulometria	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
<0,297	0,3204	0,3240	0,2847	0,2718	0,2754
0,297-0,500	0,3411	0,3615	0,2829	0,2730	0,2670
0,50-0,84	0,3561	0,4236	0,2895	0,2700	0,2745
0,84-1,00	0,3576	0,5568	0,2868	0,2691	0,2724
1,00-1,70	0,3615	0,8403	0,2928	0,2772	0,2781

Fonte: A autora.

Os tratamentos foram os mesmos descritos no capítulo anterior, ou seja, cinco corretivos (44,23% CaO e 7,68% MgO; 31,73% CaO e 20,26% MgO; 55,58% CaO e

1,84% MgO; 34,62% CaO e 23,79% MgO; 46,17% CaO e 13,44% MgO) e cinco granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm), com quatro repetições. Devido às condições ambientais controladas, as unidades experimentais foram distribuídas em um delineamento inteiramente ao acaso (DIC).

Após a calagem, o solo foi incubado por 30 dias com a umidade na capacidade de campo para que ocorresse a correção da acidez. A umidade foi controlada por meio da pesagem dos recipientes; o volume de água perdido era repostado com base na diferença de massa entre o recipiente na capacidade campo e seu valor atual, considerando a densidade da água igual a 1 g cm^{-3} . Os tratamentos foram colocados em recipientes de plástico de 500 mL com a tampa perfurada para ocorrência de trocas gasosas entre o meio e a atmosfera (Figura 4). As avaliações foram feitas com 30, 90 e 120 dias após a incubação, avaliando o pH em água, cloreto de cálcio (CaCl_2), SMP e foram determinados os teores de cálcio e magnésio no solo. Todas as análises químicas foram realizadas no LABAS, localizado na Universidade Federal de Uberlândia *campus* Umuarama.

Figura 4 – Implantação do teste de incubação dos solos com diferentes corretivos de acidez e granulometrias. Uberlândia – MG



Legenda: A – Coleta e preparo do solo. B – Elevação da umidade para capacidade de campo do solo. C – Distribuição dos tratamentos na área experimental.

Fonte: A autora.

8.2 Análises das variáveis de estudo

Para determinação do pH em água, foram coletados 10 cm³ de terra fina seca ao ar (TFSA) de cada tratamento com o auxílio de um cachimbo dosador e posteriormente foram adicionados a copos de plástico de 100 mL. A TFSA foi obtida após ser retirada uma amostra do solo incubado, que foi espalhada em um prato plástico para secagem ao ar livre; após a secagem, a amostra foi destorroada com o uso de um rolo de massa e passada na peneira de 2 mm. Foram acrescentadas 25 mL de água destilada em cada recipiente e em seguida as amostras foram misturadas com bastão individual e deixadas por 60 min em repouso. Após esse período ocorreu uma nova agitação com bastão de vidro nos recipientes, seguida pela leitura do pH da suspensão utilizando um potenciômetro (Figura 5 – A). Precedente a leitura, o equipamento foi calibrado com soluções padrões a pH 4,00 e 7,00 (Silva *et al.*, 2009).

Para determinação do pH em CaCl₂, após a coleta de 10 cm³ de terra fina seca ao ar (TFSA) o material foi colocado em um copo plástico e em seguida acrescentou-se 25 mL de solução de CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹). A solução foi agitada com bastão individual e deixada em descanso por 15 min; após este período agitou-se novamente as amostras utilizando um agitador de mesa, neste caso os copos foram tampados. Depois da agitação, a suspensão foi deixada em repouso 30 min para equilíbrio e decantação, para posterior leitura com o potenciômetro (Silva *et al.*, 2009).

O pH determinado na solução SMP, empregado para estimar a acidez potencial, foi obtido da seguinte forma, retomada da suspensão de CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹), adição de 5,0 mL do tampão SMP, agitação por 15 min em mesa agitadora e posterior repouso por 60 min. Em seguida com o pHmetro calibrado foi efetuada a leitura do pH SMP. Os dados obtidos após a leitura foram convertidos para os teores de hidrogênio e alumínio (H+Al) que representam a acidez potencial, por meio da equação de regressão (Equação 3) calibrada pelo Instituto Agrônômico (IAC) e com ajuste (R²) de 0,98.

Equação (3):

$$\ln (H+Al) = 7,76 - 1,053 * \text{pH SMP}$$

Onde:

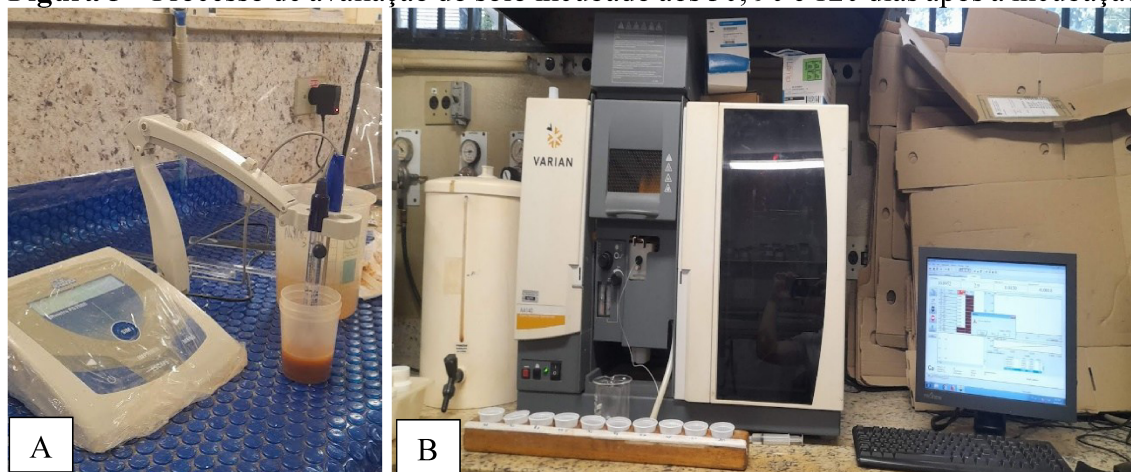
Ln= logaritmo natural.

pH SMP = valor da leitura obtida.

Os teores de Ca e Mg foram obtidos a partir da extração em cloreto de potássio (KCl) a 1 mol L⁻¹. Tomou-se para esta análise 5 cm³ de TFSA em um copo plástico de

100 mL, onde foram acrescentados 50 mL de KCl 1 mol L⁻¹. Em uma mesa de agitação as amostras foram agitadas por 5 min e deixadas para que o processo de decantação ocorresse por 24 h. A determinação dos dois elementos foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica sendo utilizado 1 mL de extrato e 9 mL de óxido de lantânio diluído a 0,5 (m/v). Para leitura das amostras, o equipamento foi previamente aquecido e calibrado com soluções padrões, sendo feita a leitura do branco (água destilada + óxido de lantânio) para fazer a correção dos valores obtidos. Após as avaliações aos 30, 90 e 120 dias os dados do teste de incubação foram submetidos a análise estatística.

Figura 5 – Processo de avaliação do solo incubado aos 30, 90 e 120 dias após a incubação



Legenda: A – Leitura do pH em água do solo incubado. B – Determinação dos teores de cálcio e magnésio utilizando o espectrofotômetro de absorção atômica.

Fonte: A autora.

8.3 Análise estatística

O delineamento experimental adotado foi de parcelas subdivididas considerando o tempo (30, 90 e 120 dias) como fator de subparcela e o fatorial (5 materiais x 5 granulometrias) como fator de parcela. Como a maioria das variáveis apresentou desvios na homocedasticidade e/ou normalidade dos resíduos, checados pelo teste de Levene e Kolmogorov-Smirnov respectivamente, a 0,01 de significância, foi identificado que o não atendimento das pressuposições ocorreu devido a discrepâncias na variação dos tratamentos dentro de um dos fatores, verificado por meio dos gráficos Boxplot.

Assim, foi inserido ao modelo a estrutura de variância que insere um parâmetro de variação para cada nível do tratamento desejado (estrutura VarIdent) por meio do método dos mínimos quadrados generalizados. Para as variáveis pH em água, pH em cloreto de cálcio e acidez potencial a estrutura de controle de variância foi utilizada no

fator granulometria; para o teor de magnésio no solo a estrutura de controle de variâncias foi utilizada nos fatores granulometria e materiais (calcários). A checagem da qualidade do ajuste do modelo foi realizada por meio da plotagem dos resíduos versus os valores ajustados e pelos gráficos q-q plots. Devido a uma falha de calibração no equipamento na leitura dos teores de cálcio no solo aos 90 dias estes dados foram retirados da contagem para análise desta variável, sendo apresentado o resultado aos 30 e 120 dias.

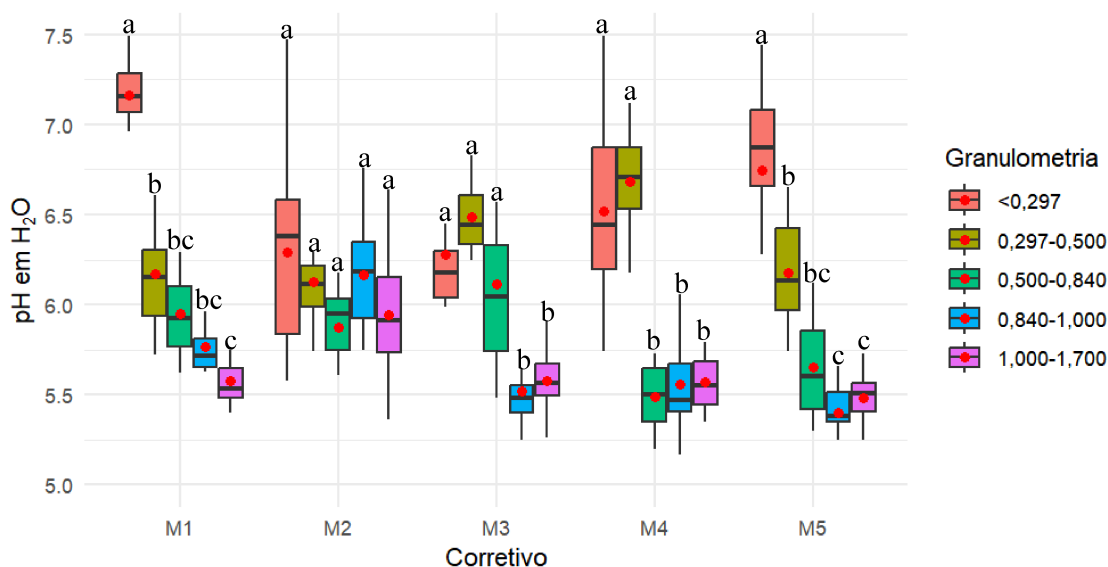
Quando diferenças significativas foram detectadas pelo teste de F ($p\text{-valor} < 0,05$) para os fatores do estudo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 0,05 de significância, com os intervalos de confiança ajustados pelo método de Šidák. Todas as análises foram executadas no software R versão 4.4.3.

9 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação entre material e granulometria foi significativa para pH em água (p-valor $<0,01$), pH em CaCl_2 (p-valor $<0,01$), acidez potencial (p-valor $<0,01$) e teor de magnésio (p-valor $<0,01$) e a interação entre granulometria e dias foi significativa para pH em água (p-valor $<0,05$). O fator dias foi analisado de forma independente para pH em CaCl_2 (p-valor $<0,01$), acidez potencial (p-valor $<0,01$), teor de cálcio (p-valor $<0,01$) e teor de magnésio (p-valor $<0,05$). Não houve interação dupla entre os fatores para variável teor de cálcio, sendo assim as fontes de estudo foram avaliadas de forma independente.

De modo geral, os maiores valores de pH em água foram observados nas granulometrias mais finas (Figura 6). De acordo com o teste de médias o material 2 (31,73% CaO e 20,26% MgO) foi o único que não proporcionou diferenças significativas entre as granulometrias estudadas. Para os materiais 1 (44,23% CaO e 7,68% MgO) e 5 (46,17% CaO e 13,44% MgO) as maiores médias de pH em H_2O foram obtidas na granulometria de $<0,297$ mm; nas frações de 0,297-0,500 mm; 0,500-0,840 mm as médias de pH foram intermediárias e nas partículas mais grosseiras o pH foi menor. Para o material 3 (55,58% CaO e 1,84% MgO) as frações $<0,297$; 0,297-0,500 e 0,500-0,840 mm se equiparam no valor de pH; e as de $<0,297$ e 0,297-0,500 mm foram semelhantes para o material 4 (34,62% CaO e 23,79% MgO); aos 0,840-1,000 mm e 1,000-1,700 mm os solos foram mais ácidos do que os demais tratamentos para estes materiais (3 e 4). Os autores Pandolfo e Tedesco (1996) também observaram que o calcário mais fino apresentou maior eficiência no aumento do pH para diferentes tipos de solo. Ao testar doses de calcário e granulometria, Gonçalves *et al.* (2011) relataram que os valores de pH do solo em diferentes sistemas de plantio foram superiores nos tratamentos utilizando calcário com granulometria mais fina. Os materiais com menor granulometria apresentam maior superfície de contato com o solo quando comparados aos materiais de maior granulometria, o que pode explicar a maior reação no solo.

Figura 6 – Valores médios do pH em água dos materiais corretivos de acidez estudados em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm)

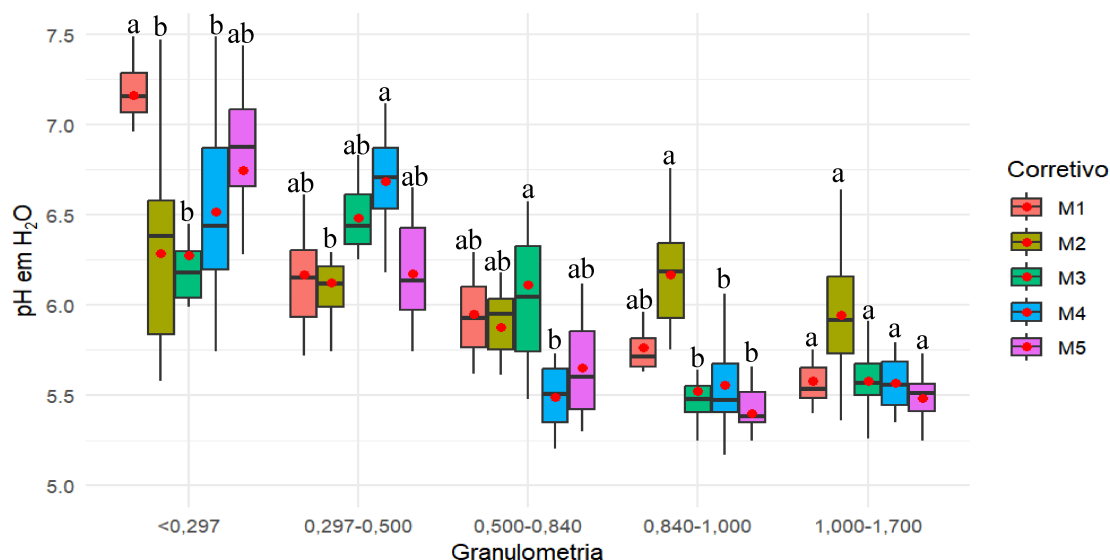


Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Os materiais estudados apresentaram comportamentos distintos na elevação do pH em água em uma mesma faixa granulométrica. Este resultado demonstra que há diferenças na solubilidade e reação do corretivo, apesar de terem a mesma granulometria. Nas frações <0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840 e 0,840-1,000 mm os materiais com diferentes concentrações de CaO e MgO apresentaram médias de pH em água distintas. Apenas na granulometria de 1,000-1,700 mm as médias se equiparam (Figura 7). Além das concentrações de Ca e Mg outros fatores parecem ter influenciado na solubilidade dos materiais. Merlotto (2024) aponta que materiais de origem sedimentar podem ser duas vezes mais solúveis do que os de fonte metamórfica, considerando a mesma peneira; e os calcários sedimentares podem ser mais reativos do que os metamórficos, devido a porosidade e cristalinidade dos materiais. Bellingieri *et al.* (1992) relatam que os corretivos variam quanto às características mineralógicas e em conjunto a composição química e granulométrica podem afetar a capacidade total de neutralização da acidez do solo.

Figura 7 – Valores médios do pH em água do solo incubado com granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm) em função dos materiais de correção de acidez



Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

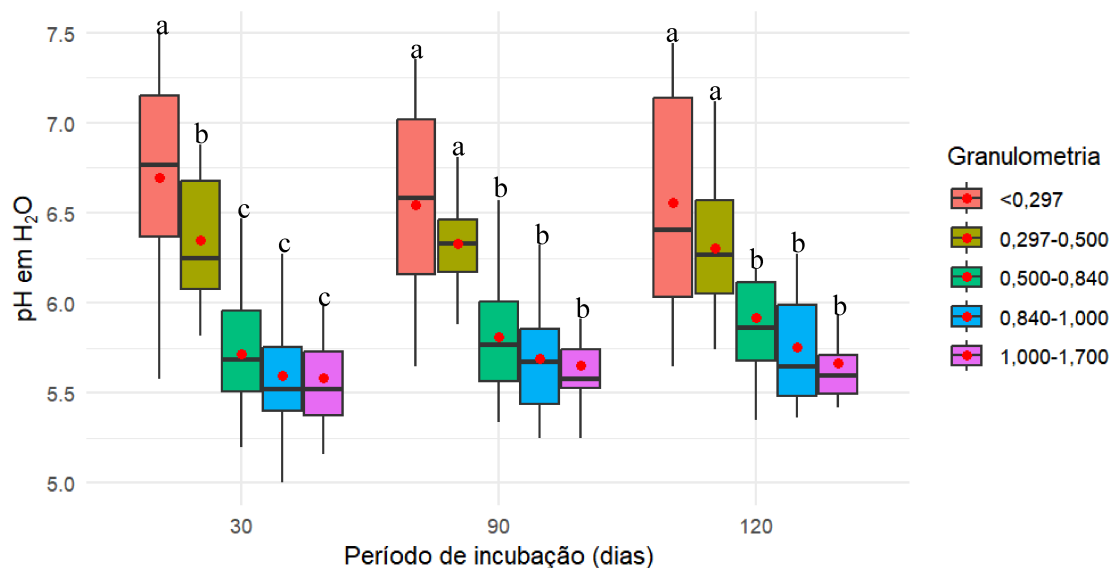
Fonte: A autora.

Aos 30 dias após a incubação os materiais com granulometria <0,297 mm proporcionaram maior elevação do pH do solo, seguido pelos materiais de 0,297-0,500 mm; as frações mais grossas (0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm) apresentaram médias inferiores (Figura 8). Aos 90 e 120 dias os calcários nas frações <0,297 e 0,297-0,500 mm se equiparam e foram superiores aos de 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm (Figura 8). É possível que o período de 120 dias não tenha sido suficiente para os materiais com partículas mais grossas reagirem, já que estes apresentam menor superfície de contato com o solo e consequentemente menor reatividade. Espera-se, contudo, que estes apresentem maior efeito residual e continuem reagindo por mais tempo no solo.

Mediante o exposto na Figura 9, os materiais de granulometria mais fina (<0,297 e 0,297-0,500 mm) atingiram estabilidade na elevação do pH logo aos 30 dias, sendo esse valor mantido aos 90 e 120 dias. No entanto, os materiais de 0,500-0,840 e 0,840-1,000 mm apresentaram acréscimo significativo no pH aos 90 e 120 dias, demonstrando maior efeito residual das partículas. Para a fração mais grossa (1,000-1,700 mm), os valores de pH foram estatisticamente semelhantes, o que dá margem à hipótese de que estes materiais reagiram muito pouco no período de incubação avaliado. Gonçalves *et al.* (2011) apontam que a velocidade de reação do corretivo e o efeito residual são grandezas inversas, que se contrapõem, e que os materiais finamente divididos reagem mais rápido

no solo. Os autores Natale *et al.* (2007) afirmam que quanto maior a granulometria maior será o efeito residual, isso porque a ação do calcário depende do contato com o solo e para partículas maiores a superfície de contato é menor.

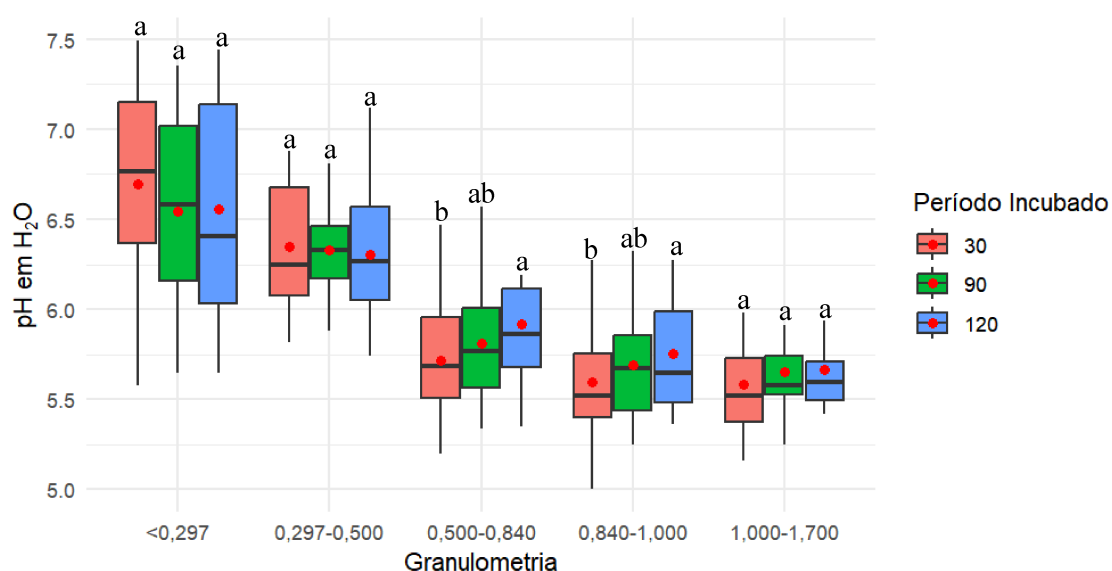
Figura 8 – Valores médios do pH em água do solo incubado com corretivos nas granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm) aos 30, 90 e 120 dias após a incubação



Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Figura 9 – Valores médios do pH em água do solo incubado com granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm) em função dos materiais de correção de acidez

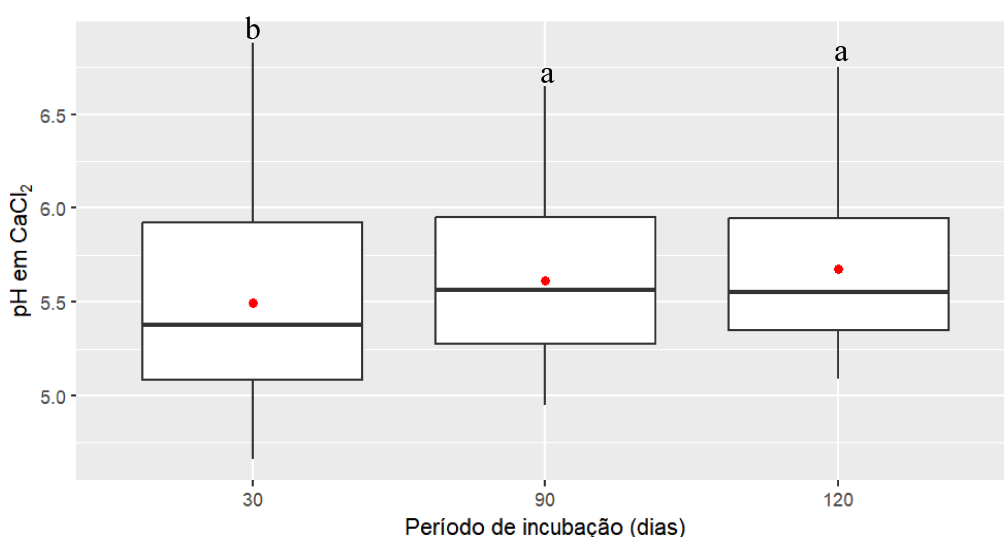


Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Independentemente do material e da granulometria adotada, os maiores valores de pH em CaCl_2 foram obtidos após 90 dias de incubação e foram mantidos aos 120 dias, demonstrando ter atingido a estabilidade na atividade do solo (Figura 10). Em concordância com este resultado, os autores Santos Filho *et al.* (2018), que avaliaram o pH em CaCl_2 sob diferentes solos e granulometrias de calcário, relataram que após os 90 dias de incubação as determinações não apresentaram variações, o que pode ser considerado como uma ligeira estabilização.

Figura 10 – Valores médios do pH em CaCl_2 do solo incubado em função do tempo de incubação (30, 90 e 120 dias)



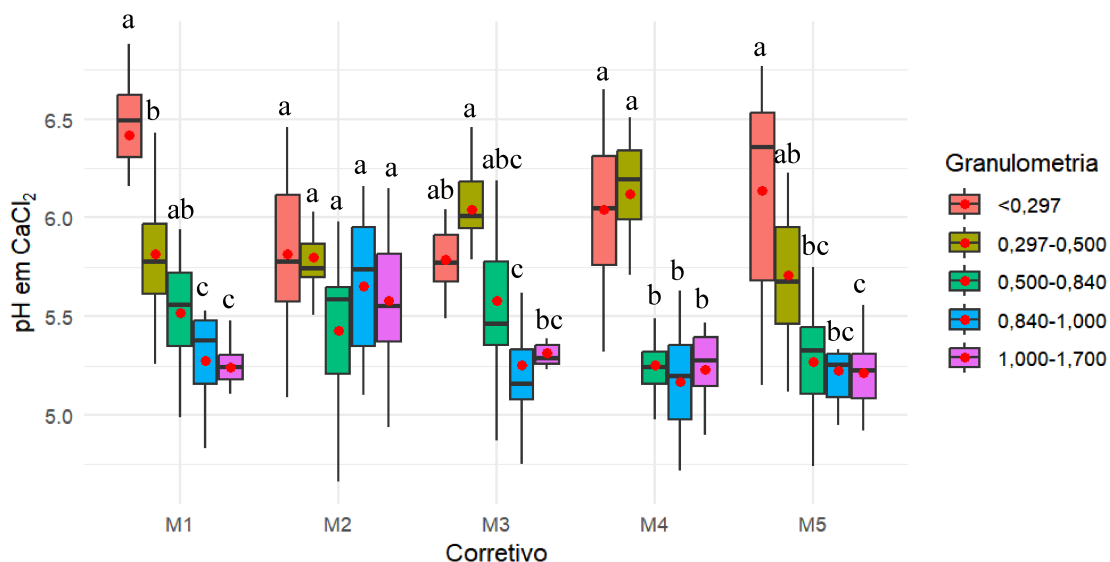
Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Conforme a Figura 11, observa-se que o comportamento dos materiais em função das granulometrias estudadas na elevação do pH em CaCl_2 manteve as tendências do pH em H_2O , o material 2 não apresentou diferenças significativas entre as granulometrias e os materiais 1, 3, 4 e 5 apresentaram médias superiores nas granulometrias mais finas.

Para o pH em CaCl_2 os calcários com mesmo grau de finura se diferiram entre si apenas na granulometria $<0,297$ mm; a partir da granulometria de 0,297-0,500 mm os materiais apresentaram médias semelhantes para este parâmetro (Figura 12). A menor variação das médias de pH em cloreto de cálcio quando comparado ao pH em água pode ser justificada pela presença de sais na determinação, que proporciona maior repetibilidade dos dados (Almeida; Ernani, 1996).

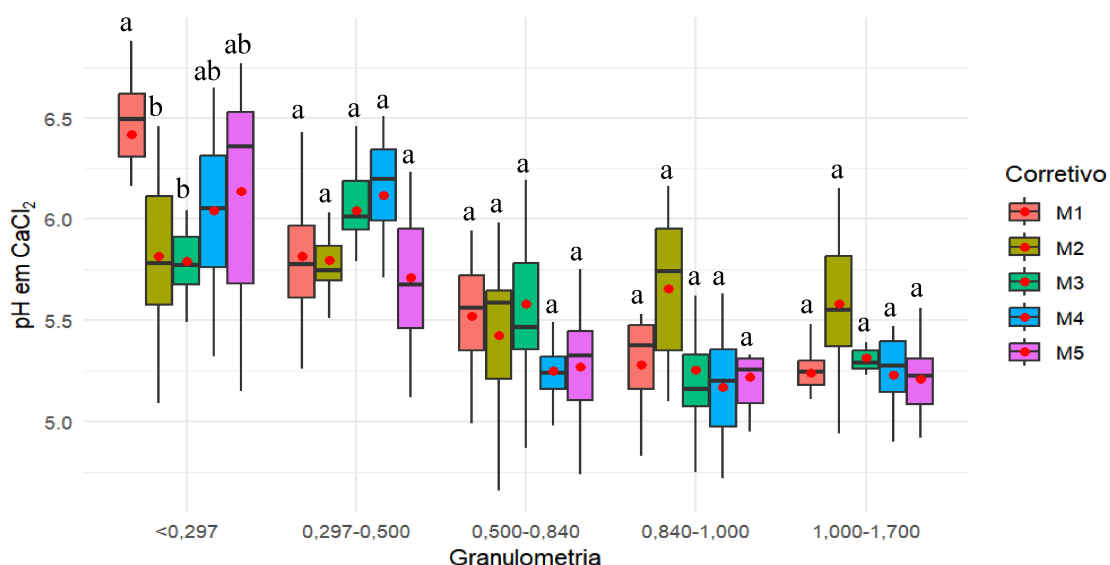
Figura 11 – Valores médios do pH em CaCl_2 do solo incubado com materiais corretivos de acidez em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm)



Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Figura 12 – Média do pH em CaCl_2 do solo incubado nas granulometrias <0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm em função dos materiais de correção de acidez



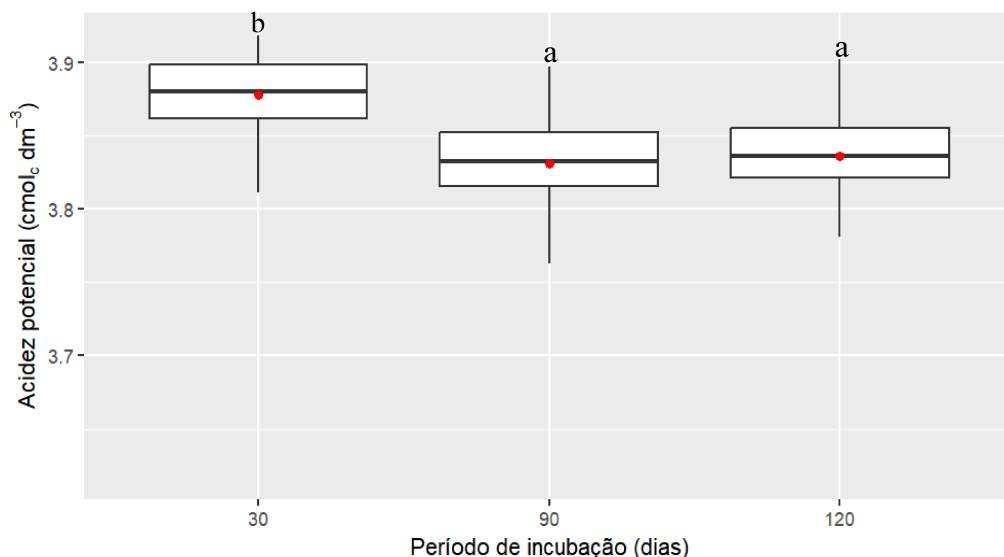
Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

A acidez potencial (H^+/Al) em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ reduziu após 90 dias de incubação com calcário, independente do material e granulometria; e aos 120 dias já não houve alteração

significativa, indicando uma estabilidade nesta determinação (Figura 13). Em acordo com este resultado, Merlotto (2024) também observou redução nas concentrações de H+Al após 90 dias de incubação ao testar diferentes materiais para correção de acidez.

Figura 13 – Valores médios da acidez potencial (H+Al), em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, do solo incubado em função do tempo de incubação (30, 90 e 120 dias)

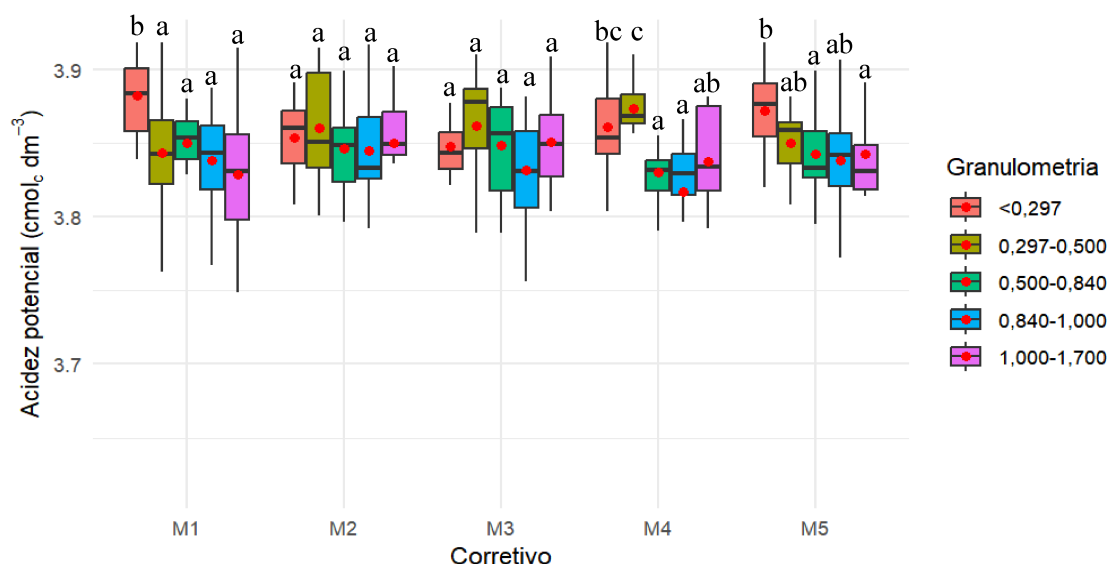


Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Os materiais 2 e 3 não apresentaram diferenças significativas entre as granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm) na redução da acidez potencial; entretanto, os materiais 1 e 5 apresentaram menor teor de H+Al a partir da granulometria de 0,297-0,500 mm; para o material 4 a redução na acidez potencial foi maior para as granulometrias acima de 0,500-0,840 mm (Figura 14).

Figura 14 – Valores médios de $H+Al$ ($cmol_c\ dm^{-3}$) do solo após incubação com corretivos de acidez em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm)



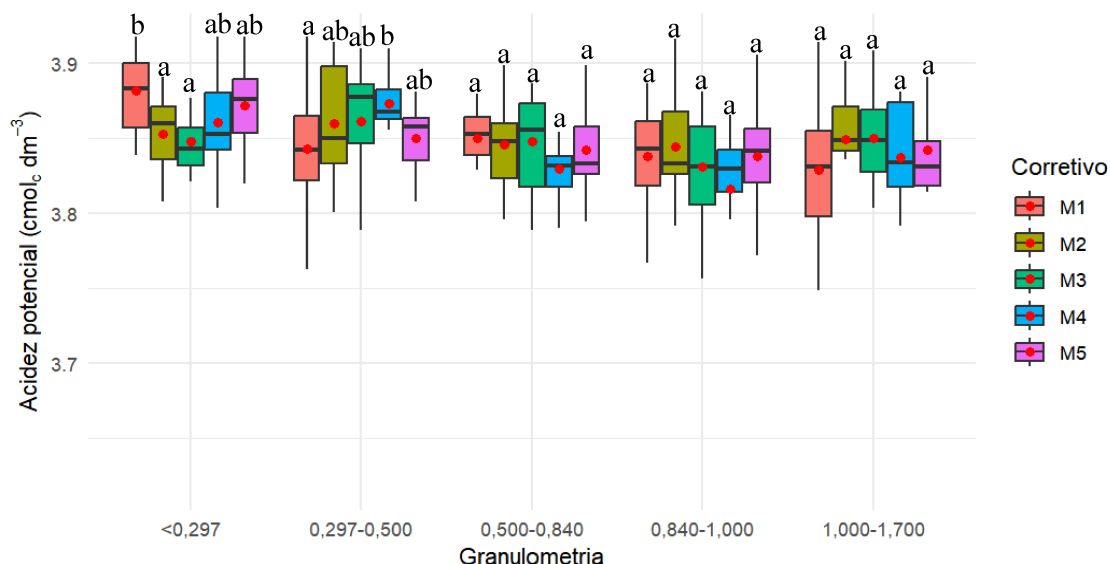
Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Em um mesmo grau de finura, apenas para frações <0,297 e 0,297-0,500 mm houve diferenças entre os corretivos na redução da acidez potencial (Figura 15). Os materiais 2 (31,73% CaO e 20,26% MgO) e 3 (55,58% CaO e 1,84% MgO) foram superiores ao material 1 (44,23% CaO e 7,68% MgO) na fração <0,297 mm e o material 1 (44,23% CaO e 7,68% MgO) superior ao material 4 (34,62% CaO e 23,79% MgO) na granulometria de 0,297-0,500 mm. A diferença dos corretivos com mesmo tamanho de partícula na manifestação da acidez potencial está em concordância com a variabilidade que há entre cada material, assim como foi apresentado acima para as variáveis pH em água e $CaCl_2$.

Para o teor de cálcio no solo, houve diferenças significativas pelo teste F para o corretivo de acidez ($p\text{-valor} < 0,01$), granulometria ($p\text{-valor} < 0,01$) e dias ($p\text{-valor} < 0,05$). O teor inicial de cálcio no solo correspondia a $1,06\ cmol_c\ dm^{-3}$, aos 30 dias após calagem a média foi de $3,29\ cmol_c\ dm^{-3}$, com elevação significativa aos 120 dias atingindo $3,56\ cmol_c\ dm^{-3}$ (Figura 16). A aplicação de calcário promoveu elevação dos teores de Ca^{2+} e o maior tempo de contato do corretivo com o solo (120 dias) justificou o maior teor deste macronutriente. Soratto *et al.* (2019) também observaram incremento significativo nos teores de cálcio no solo após calagem, independente da origem da rocha ou tamanho de partícula.

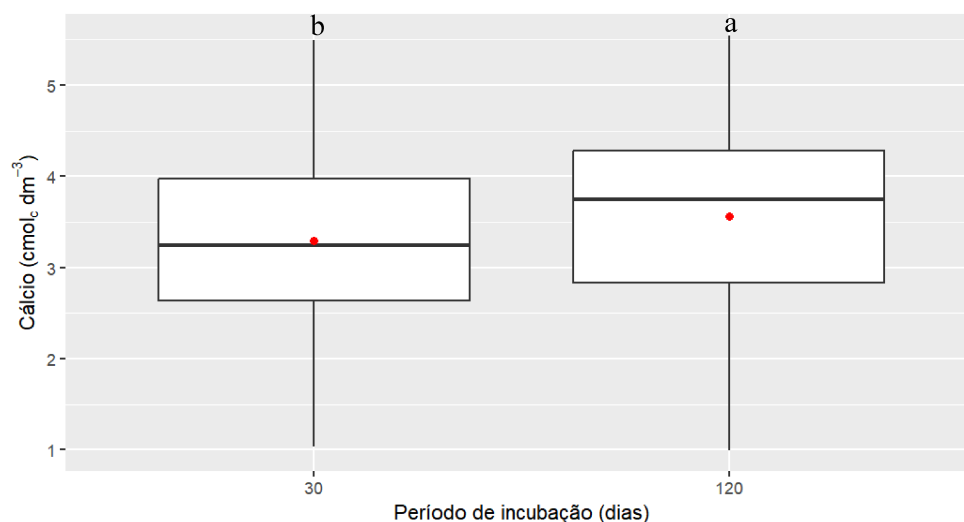
Figura 15 – Valores médios de $H+Al$ ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) do solo incubado nas granulometrias de $<0,297$; $0,297-0,500$; $0,500-0,840$; $0,840-1,000$; $1,000-1,700$ mm em função dos materiais de correção de acidez



Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Figura 16 – Concentração de cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) do solo em função do tempo de incubação (30 e 120 dias)



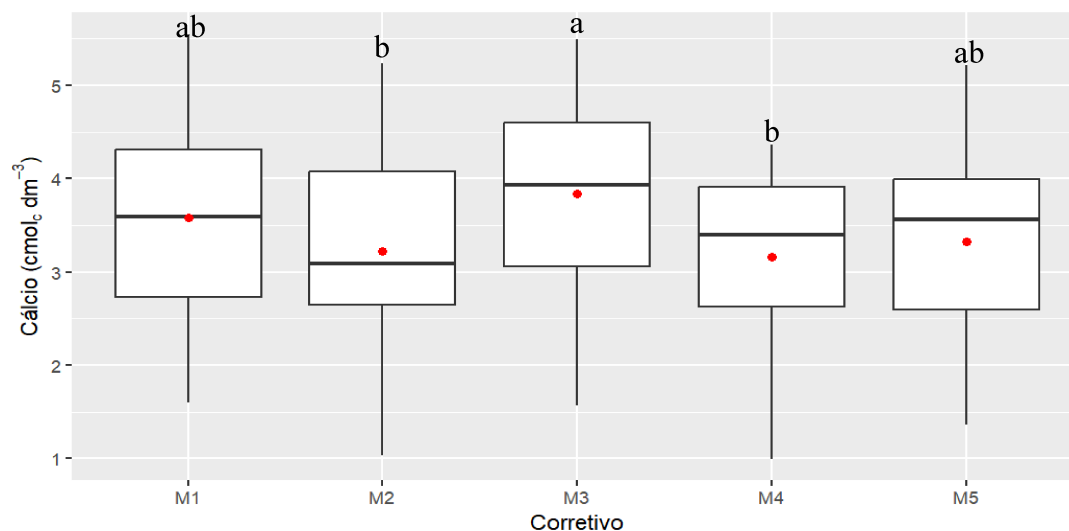
Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

A elevação dos teores de cálcio no solo em função dos calcários estudados foi coerente com os teores de CaO na composição, sendo que os materiais com maior teor de CaO disponibilizaram mais Ca^{2+} e os de menor teor disponibilizaram menos (Figura 17). O material 3 (55,58% CaO e 1,84% MgO) apresentou média de Ca^{2+} no solo superior aos

materiais 2 (31,73% CaO e 20,26% MgO) e 4 (34,62% CaO e 23,79% MgO), e foi equivalente aos materiais 1 (44,23% CaO e 7,68% MgO) e 5 (46,17% CaO e 13,44% MgO).

Figura 17 – Concentração de cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) do solo em função dos calcários com diferentes concentrações de CaO



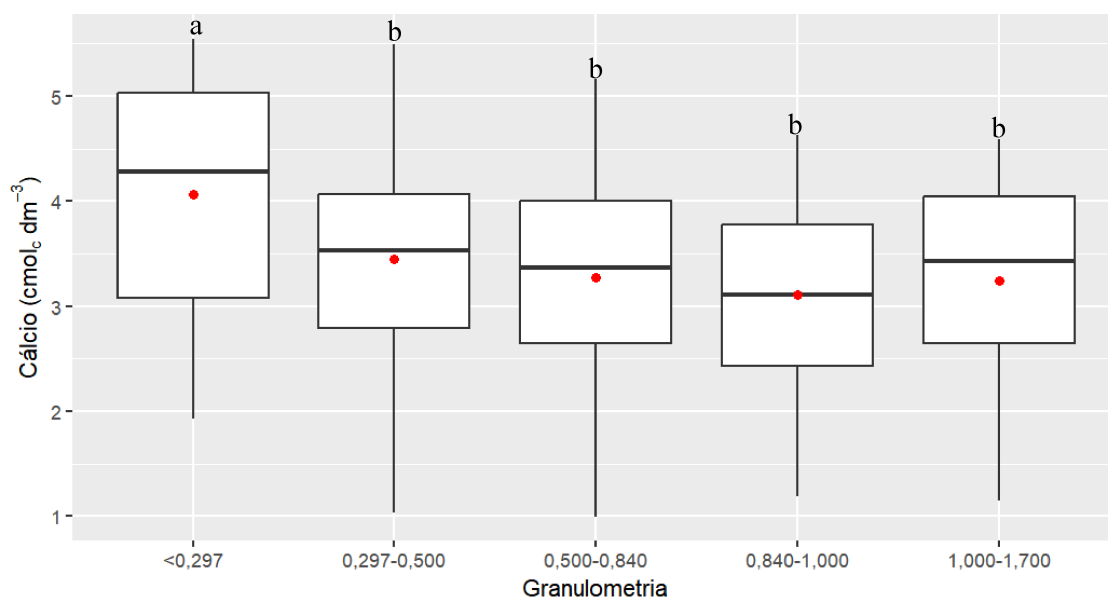
Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Em relação ao tamanho de partícula dos corretivos o material mais fino ($<0,297 \text{ mm}$) apresentou maior potencial na elevação dos teores de cálcio do solo, dado maior superfície de contato entre o calcário com as partículas do solo e consequente aumento na reatividade (Figura 18).

Os teores de magnésio no solo (Mg^{2+}) não se diferiram estatisticamente em função do tempo de incubação (30, 90 e 120 dias) de acordo com o teste de Tukey a 5%, indicando estabilidade na elevação dos teores de magnésio do solo desde a primeira avaliação, com média de $0,395 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Figura 19).

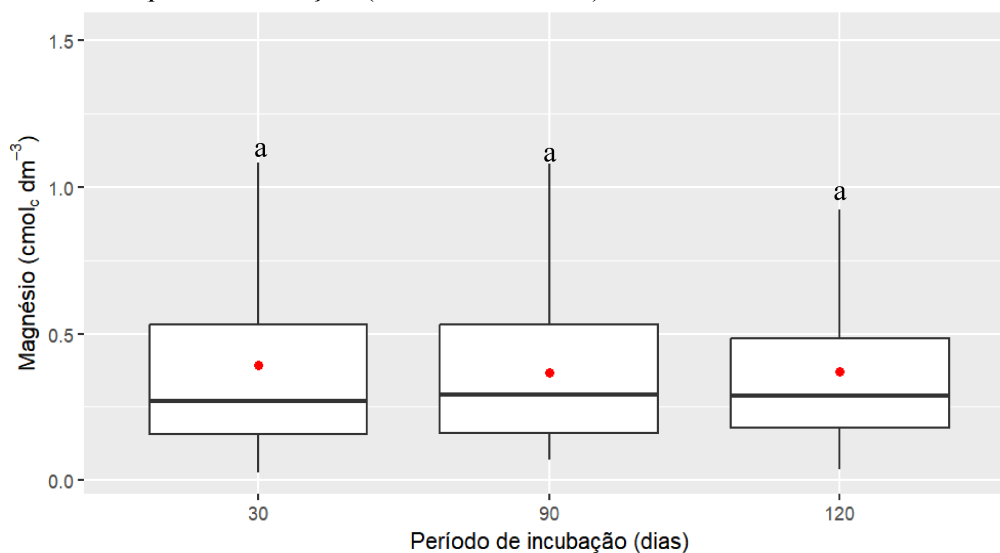
Figura 18 – Concentração de cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) do solo em função do tamanho de partícula dos corretivos de acidez



Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Figura 19 – Teores de magnésio (Mg^{2+}) em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ do solo incubado em função do tempo de incubação (30, 90 e 120 dias)



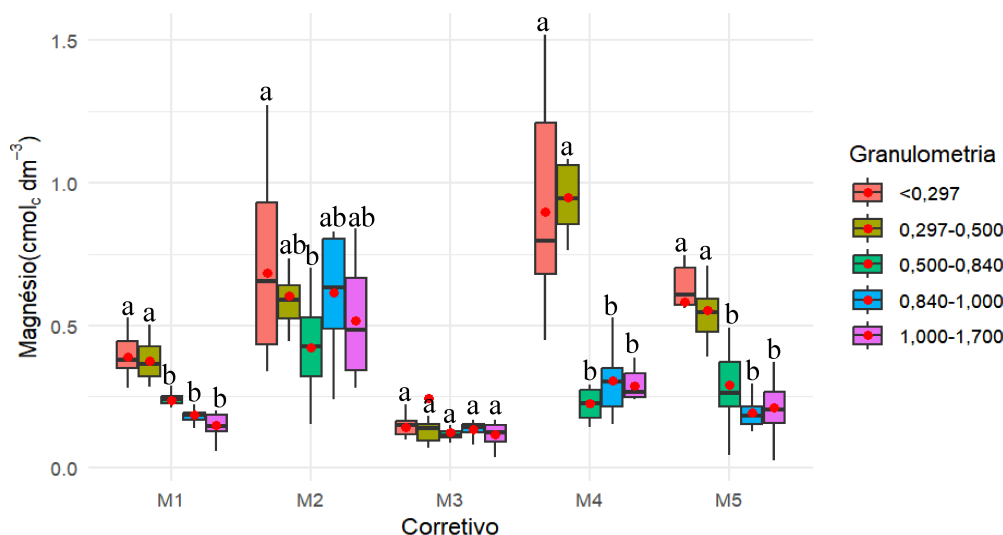
Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

Avaliando a interação entre granulometrias e calcários, os materiais nas frações mais finas (<0,297 mm e 0,297-0,500 mm) apresentaram médias superiores dos teores de Mg^{2+} no solo, com exceção do material 3 (Figura 20). Este resultado era esperado, tendo em vista maior reatividade dos materiais e maior superfície de contato com o solo. A

igualdade entre as médias do teor de Mg^{2+} no solo para o material 3 (55,58% CaO e 1,84% MgO) pode ser explicada pelos baixos teores de magnésio neste material, que provavelmente limitou a expressão dos efeitos do tamanho de partícula (Figura 20).

Figura 20 – Teores de magnésio (Mg^{2+}), em $cmol_c\ dm^{-3}$, do solo após incubação com calcários em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm)



Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

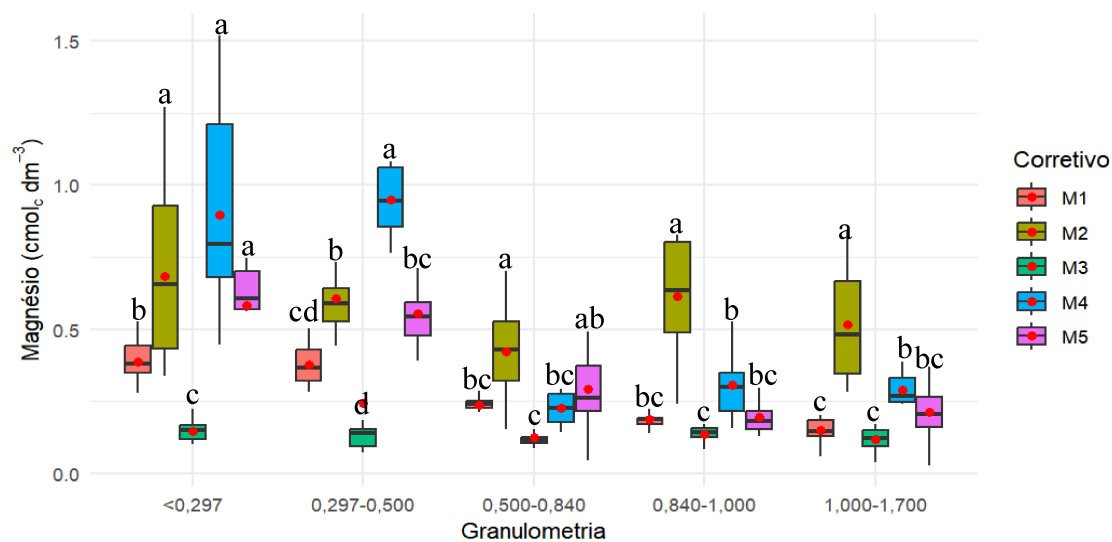
Fonte: A autora.

Em relação ao comportamento dos materiais em uma mesma fração granulométrica, os calcários dolomíticos apresentaram maior potencial em elevar os teores de magnésio (Figura 21). Em todas as granulometrias estudadas o material 3 (55,58% CaO e 1,84% MgO), calcítico, resultou em menores médias para esta variável no solo; seguido pelo material 1 (44,23% CaO e 7,68% MgO), que também possui baixo teor de MgO quando comparado aos demais corretivos aplicados. O material 2 (31,73% CaO e 20,26% MgO) disponibilizou maior concentração de Mg^{2+} no solo nas frações de 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm; sendo equivalente ao material 4 (34,62% CaO e 23,79% MgO) na fração <0,297 mm e ao 5 (46,17% CaO e 13,44% MgO) na fração 0,500-0,840 mm. Os tratamentos que receberam aplicação do material 4 apresentaram médias superiores de magnésio na fração de 0,297-0,500 mm.

Os autores Peixoto *et al.* (2019), ao avaliarem atributos químicos do solo após aplicação com produtos com cálcio e magnésio, também observaram que o calcário dolomítico apresentou melhor fornecimento de Mg no solo, por apresentar maior teor deste elemento quando comparado aos demais. Holzschuh (2007) aponta que o aumento

dos teores de cálcio e magnésio trocáveis é coerente com a variação na composição de Ca e Mg dos corretivos.

Figura 21 – Teores de magnésio (Mg^{2+}) do solo, em $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, incubado nas granulometrias de <0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000; 1,000-1,700 mm em função dos materiais de correção de acidez



Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. A linha horizontal no interior das caixas representa a mediana, e o ponto em vermelho, a média dos dados.

Fonte: A autora.

10 CONCLUSÃO

Em um mesmo grau de finura os calcários estudados apresentam diferentes comportamentos na elevação do pH, demonstrando que outros fatores além da granulometria podem influenciar na reatividade dos corretivos, dentre eles a solubilidade. Os materiais de granulometria mais fina foram mais efetivos na correção da acidez ativa, mensurada através do pH em água e em cloreto de cálcio e na elevação dos teores de Ca e Mg do solo.

A redução na acidez potencial (H^+Al) e aumento do pH em $CaCl_2$ ocorreram após 90 dias de incubação do solo. A maior disponibilidade de cálcio ocorreu aos 120 dias e os teores de magnésio se estabilizaram logo após a avaliação de 30 dias. A elevação dos teores de cálcio e magnésio no solo foi coerente com os teores de CaO e MgO presente nos materiais. E maiores teores destes elementos foram disponibilizados quando utilizado corretivos de granulometria mais fina.

REFERÊNCIAS

AGEGNEHU, G.; AMEDE, T.; ERKOSSA, T.; YIRGA, C.; HENRY, C.; TYLER, R.; *et al.* Extent and management of acid soils for Sustainable Crop Production system in the tropical agroecosystems: a review. **Acta Agriculturae Scandinavica**, v. 71, n. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>. Acesso em: 20 mar. 2025.

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: Características e interpretações técnicas**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 24 p, 2005. Disponível em: https://anda.org.br/wp-content/uploads/2019/03/boletim_06.pdf. Acesso em: 29 mai. 2025.

ALMEIDA, J. A, de.; ERNANI, P. R. Influência do solvente, da relação solo/solvente, e da incubação das amostras úmidas na variação do pH de solos catarinenses. **Ciência Rural**, v. 21, n. 1, p. 81-85, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84781996000100015>. Acesso em: 21 mar. 2025.

ARAÚJO, Rafaela Bezerra de. **Agregação do solo sob efeito da reaplicação dos corretivos da acidez do solo e do gesso agrícola em plantio direto**. 2022. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: https://deposita.ibict.br/bitstream/deposita/392/2/RAFAELA_BEZERRA DISSERTA%C3%87%C3%83O.pdf. Acesso em: 29 mai. 2025.

BELLINGIERI, P. A.; SOUZA, E. C. A.; ALCARDE, J. C.; SHIKASHO, H. W. Importância da reatividade do calcário sobre a produção e algumas características da cultura da soja. **Scientia Agrícola**, v. 49, n. 1, p. 61-71, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90161992000400010>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BRASIL. Instrução Normativa SDA nº 35, de 4 de julho de 2006. Dispõe sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília: DF, n. 132, p. 1-10, 12 jul. 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corrretivos.pdf/view>. Acesso em: 23 out. 2024.

GALLO, J. R.; CATANI, R. A. Solubilidade de alguns tipos de calcários. **Bragantia**, v. 13, n. 5, 1954. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/S7YjzNTgp7Q88j5ppsy7m4c/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 19 mar. 2025.

GONÇALVES, J. R. P.; MOREIRA, A.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, A. C.; BOAS, R. L. V. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 369-375, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.3659>. Acesso em: 20 mar. 2025.

HOLZSCHUH, Marquel Jonas. **Eficiência de calcário calcítico e dolomítico na correção da acidez de solos sob plantio direto**. 2007. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/5593/MARQUEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 mar. 2025.

MARASCHIN, L.; SCARAMUZZA, J. F.; VIEIRA, C. R. Incubação do calcário e as características químicas de solos com textura diferentes. **Nativa**, v. 8, n. 1, p. 43-51, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i1.6908>. Acesso em: 20 mar. 2025.

MERLOTTO, Gabriel Rodrigo. **Solubilidade e reatividade de calcários sedimentares e metamórficos**. 2024. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, IAC, Campinas, 2024. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/Gabriel_Rodrigo_Merlotto.pdf. Acesso em: 23 out. 2024.

NATALE, W.; PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; ROMUALDO, L. M. Efeitos da calagem na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1475-1485, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600024>. Acesso em: 21 mar. 2025.

PANDOLFO, C. M.; TEDESCO, M. J. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcário na correção da acidez do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 31, n. 10, p. 753-758, 1996. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/viewFile/4545/1831>. Acesso em: 20 mar. 2025.

PEIXOTO, D. J. G.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; MIOLA, V.; PEREIRA, N.; ANDRADE, E. A. de. Atributos químicos do solo após incubação com produtos com cálcio e magnésio. **Acta Iguazu**, v. 8, n. 3, p. 62-68, 2019. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/21208/14709>. Acesso em: 25 mar. 2025.

SANTOS FILHO, R. R, dos.; OLIVEIRA, D. A. S.; SILVA, E. A, da.; SANTOS, J. C. C, dos.; PAULINO, S. S.; SANTOS, C. G, dos. Avaliação da reatividade de corretivos com diferentes granulometrias na acidez em Argissolos. **Ambientale**, v. 2, p. 30-38, 2018. Disponível em: <https://periodicosuneal.emnuvens.com.br/ambientale/article/download/45/44/93>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SHAABAN, M. Acidic Soils. In: DELGADO, A. N. **Planet Earth: Scientific Proposals to Solve Urgent Issues**. 1.ed. Springer Nature Switzerland, 334p. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-53208-5>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SILVA, F. C, da. Métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. In: SILVA, F. C, da.; *et al.* **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 112. 2009. Disponível em

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>. Acesso em: 20 set. 2024.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; VITTI, G. C. Reactivity of sedimentary and metamorphic limestones of different particle sizes under controlled conditions. **Communications in soil Science and plant Analysis**, v. 50, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566920>. Acesso em: 27 mar. 2025.

CAPÍTULO III

EFICIÊNCIA DE CORRETIVOS DE ACIDEZ EM DIFERENTES FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS NO CULTIVO DE SORGO (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) EM CASA DE VEGETAÇÃO

RESUMO

A calagem é uma prática que antecede o cultivo e é responsável por reduzir a acidez dos solos e aumentar as concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Dentre os fatores que influenciam na calagem destaca-se a reatividade dos corretivos. Atualmente, apenas a granulometria é considerada para estimar a reatividade, porém, outros fatores como a solubilidade dos materiais corretivos podem influenciar nesse parâmetro. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de corretivos e granulometrias no desenvolvimento do sorgo e nos atributos químicos do solo. O experimento foi conduzido na casa de vegetação da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Glória, em um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com um esquema fatorial 5x5+1 e quatro repetições. Foram estudados cinco materiais para correção de acidez (Material 1 – 44,23% CaO e 7,68% MgO; Material 2 – 31,73% CaO e 20,26% MgO; Material 3 – 55,58% CaO e 1,84% MgO; Material 4 – 34,62% CaO e 23,79% MgO e Material 5 – 46,17% CaO e 13,44% MgO), cinco granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm) e a testemunha, sem adição de calcário. Foram realizadas duas semeaduras com solos distintos para visualizar o efeito dos tratamentos em condições de poder tampão e composição química diferentes. A calagem foi realizada 30 dias antes da semeadura, que ocorreu em maio e setembro de 2024. A variedade de sorgo utilizada foi a BM 750 e as adubações de plantio e cobertura foram feitas de forma padrão conforme recomendação para a cultura. A irrigação e manejo fitossanitário foram realizados de forma uniforme em toda a área. Aos 56 e 52 dias após a 1ª e 2ª semeadura, respectivamente, foram realizadas as colheitas da parte aérea e as coletas do solo para posteriores avaliações. As variáveis analisadas foram: massa seca foliar (g), teores de cálcio e magnésio foliar (g kg^{-1}), pH em água (H_2O), pH em cloreto de cálcio (CaCl_2), acidez potencial (H^+Al) e teores de cálcio e magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os dados foram submetidos à análise de variância (p-valor <0,05), quando significativas, as médias foram comparadas utilizando teste de Tukey e análise de regressão; o teste de Dunnett foi realizado para comparar o efeito dos tratamentos com a testemunha. A interação entre corretivo e granulometria foi significativa apenas para o teor de Mg foliar na 2ª semeadura e para o teor de Mg no solo após a 1ª semeadura; as demais variáveis foram avaliadas de forma independente. Os fatores de estudo não influenciaram em nenhuma das semeaduras nos valores de pH em H_2O , H^+Al e teor de Ca no solo. Para o pH em CaCl_2 , apenas na 1ª semeadura houve influência dos materiais corretivos. Os teores de Ca e Mg foliar foram condizentes com a concentração destes elementos nos corretivos; o teor de Mg no solo após a 1ª semeadura reduziu com o aumento da granulometria para a maioria dos materiais. A granulometria (mm), de modo geral, não influenciou na resposta da maioria das variáveis. Os materiais corretivos estudados não se diferiram para a maioria dos atributos de acidez dos solos, todavia, influenciaram nas concentrações de cálcio e magnésio e promoveram aumento quando comparados aos teores que antecedem a calagem.

Palavras-chave: calagem; granulometria; semeadura.

ABSTRACT

Liming is a pre-planting practice responsible for reducing soil acidity and increasing calcium (Ca) and magnesium (Mg) concentrations. Among the factors influencing liming efficiency, the reactivity of the corrective materials stands out. Currently, only particle size is considered to estimate reactivity; however, other factors such as the solubility of corrective materials may also influence this parameter. Therefore, the objective of this study was to evaluate the influence of liming materials and particle sizes on sorghum development and soil chemical attributes. The experiment was conducted in a greenhouse at the Federal University of Uberlândia, *campus* Glória, using a completely randomized design (CRD) in a 5×5+1 factorial scheme with four replications. Five acidity-correcting materials were tested (Material 1 – 44,23% CaO and 7,68% MgO; Material 2 – 31,73% CaO and 20,26% MgO; Material 3 – 55,58% CaO and 1,84% MgO; Material 4 – 34,62% CaO and 23,79% MgO; Material 5 – 46,17% CaO and 13,44% MgO), five particle size classes (<0,297; 0,297–0,500; 0,500–0,840; 0,840–1,000; and 1,000–1,700 mm), and a control treatment with no lime application. Two sowings were carried out using different soils to observe the treatment effects under varying buffer capacity and chemical composition. Liming was applied 30 days before sowing, which occurred in May and September 2024. The sorghum variety used was BM 750, and fertilization at planting and in topdressing was applied uniformly, following crop recommendations. Irrigation and phytosanitary management were performed consistently across all plots. At 56 and 52 days after the first and second sowings, respectively, shoots were harvested, and soil samples were collected for further evaluation. The analyzed variables were: leaf dry mass (g), foliar Ca and Mg concentrations (g kg^{-1}), soil pH in water (H_2O), pH in calcium chloride (CaCl_2), potential acidity (H^+Al), and soil Ca and Mg contents (cmolc dm^{-3}). Data were subjected to analysis of variance ($p\text{-value} < 0,05$); when significant, means were compared using Tukey's test and regression analysis. Dunnett's test was used to compare the treatments with the control. The interaction between liming material and particle size was significant only for foliar Mg content in the second sowing and for soil Mg content after the first sowing; all other variables were evaluated independently. The studied factors had no significant effect on soil pH in H_2O , potential acidity (H^+Al), or Ca content in either sowing. For pH in CaCl_2 , only the first sowing was influenced by the liming materials. Foliar Ca and Mg levels reflected the concentrations of these elements in the applied materials; soil Mg content after the first sowing decreased with increasing particle size for most materials. Overall, particle size (mm) did not influence the response of most evaluated variables. Although the corrective materials did not differ significantly in most soil acidity attributes, they did affect Ca and Mg concentrations and promoted increases compared to pre-liming levels.

Keywords: liming; particle size; sowing.

11 INTRODUÇÃO

O crescimento e produtividade das culturas agrícolas em solos ácidos e com baixa saturação por bases pode ser limitado em virtude da presença de efeitos tóxicos do alumínio, manganês e ferro (Al, Mn e Fe) e deficiência de cátions como cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), (Rodrigues *et al.*, 2016). O cultivo de sorgo possui grande relevância no Brasil e apesar de sua rusticidade, solos com acidez corrigida e com boa disponibilidade de nutrientes promovem um melhor desenvolvimento para cultura (Silva, 2021).

O alumínio é um elemento que pode inibir o crescimento das plantas e a atividade do sistema radicular; o íon Al^{3+} pode reagir com o ácido fosfórico e causar deficiência de fósforo nas plantas ao formar fosfato de alumínio, insolúvel nos solos (Matsumoto *et al.*, 2017). Em solos com $\text{pH} < 5,5$ e alto potencial redox pode haver um aumento na concentração de Mn^{2+} e consequente toxicidade nas plantas (Silva, 2022); o ferro (Fe) se torna mais solúvel e disponível, quando em excesso pode causar desbalanços nutricionais, toxicidade e severas reduções no crescimento e produtividade das plantas (Jucoski *et al.*, 2016).

O cálcio e magnésio são essenciais para a cultura do sorgo, e a extração desses nutrientes no solo segue um aumento linear paralelo ao aumento da produtividade da cultura (Santos *et al.*, 2022). O cálcio faz parte da estrutura das paredes celulares, além de ser cofator de enzimas envolvidas na hidrólise de ATP e fosfolípidos, atua também como mensageiro na regulação metabólica (Taiz *et al.*, 2017). De acordo com estes autores o magnésio é requerido por muitas enzimas e é constituinte da molécula de clorofila.

A calagem é a prática mais adotada para aumentar a produção do sorgo em solos ácidos, atuando na elevação do pH e na neutralização do Al, Mn e Fe quando em níveis tóxicos. Em qualquer sistema de cultivo, a adequada correção da acidez do solo permitirá o melhor aproveitamento da maioria dos nutrientes (Moraes, 2019). A eficiência da calagem depende de diversos fatores, dentre eles a reatividade de cada material. A reatividade corresponde à porcentagem do corretivo que irá reagir no solo em um período de 3 meses.

O atual método utilizado para estimar a reatividade considera como parâmetro o tamanho das partículas de cada material (granulometria). O tamanho dos grânulos é um dos fatores que mais afeta a dissolução do calcário, já que a reação depende do contato

entre o corretivo e o solo (Pandolfo; Tedesco, 1996). Sabe-se, no entanto, que avaliar a reatividade apenas em função de atributos físicos como a granulometria pode induzir a erros, já que a reatividade também pode ser influenciada pela solubilidade das rochas, natureza geológica dos corretivos, temperatura e umidade do solo e natureza química dos corretivos (Merlotto, 2024; Alcarde, 2005).

Os materiais de mesma granulometria podem variar muito quanto a sua composição química, propriedades físico-químicas e mineralogia, sendo assim, a solubilidade de cada material corretivo de acidez depende da ação combinada destes fatores (Soratto *et al.*, 2019). A determinação da reatividade em função apenas da granulometria pode subestimar a real velocidade de ação dos corretivos no solo, impactando na recomendação e eficiência da calagem.

Com base no exposto, o objetivo deste ensaio foi avaliar a atividade de calcários com diferentes concentrações de cálcio e magnésio e tamanhos de partículas na produção de sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) e nos atributos químicos do solo após a semeadura. Além de verificar a influência de diferentes materiais em uma mesma faixa granulométrica na eficiência da calagem.

12 MATERIAL E MÉTODOS

12.1 Descrição experimental

Os experimentos foram implantados na casa de vegetação da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), *Campus* Glória, latitude -18.940655 e longitude -48.214724 em abril e agosto de 2024. O solo utilizado na primeira semeadura é classificado como Latossolo Vermelho Ácrico típico e foi coletado no mesmo local (*Campus* Glória) e o da segunda semeadura na região de Cruz Branca (Estrada Municipal 371, Km 30), área rural de Uberlândia, latitude -18.951351 e longitude -48.045839. Após a coleta, os solos foram peneirados em peneiras com malha de 2 mm e posteriormente colocados em vasos de plástico com volume de 10 dm³. Previamente foi realizada uma análise dos solos em questão (Tabelas 8 e 9) e calculada a dose de corretivo necessária para correção da acidez em função do poder de neutralização dos tratamentos utilizados (Tabela 10). No momento do preparo dos vasos já foram incorporados os tratamentos, que consistiram em cinco corretivos (44,23% CaO e 7,68% MgO; 31,73% CaO e 20,26% MgO; 55,58% CaO e 1,84% MgO; 34,62% CaO e 23,79% MgO; 46,17% CaO e 13,44% MgO) e cinco granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm) mais a testemunha, resultando em um fatorial duplo com um adicional (5x5+1). Após a incorporação do calcário os solos permaneceram incubados por um período de 30 dias, sendo mantida a umidade do solo a 80% da capacidade de campo durante este processo.

Tabela 8 – Caracterização química da amostra do solo utilizado na 1ª semeadura do sorgo, coletado na Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Glória. Uberlândia- MG

pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m
água	--mg dm ⁻³ --					cmol _c dm ⁻³				-----%	
5,8	1,27	11,20	1,02	0,24	0,00	1,90	1,28	1,28	3,18	40,29	0,00

pH: água; P: Mehlich⁻¹; K: Mehlich⁻¹; Ca²⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; Mg²⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; Al³⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: capacidade de troca catiônica efetiva; T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio.

Fonte: A autora.

Tabela 9 – Caracterização química da amostra do solo utilizado na 2ª semeadura do sorgo, coletado na área rural de Uberlândia, Cruz Branca (Estrada Municipal 371, Km 30). Uberlândia- MG

pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m
água	--mg dm ⁻³ --		-----cmol _c dm ⁻³ -----							----%----	
5,9	1,73	113,6	2,48	1,32	0,07	4,99	4,09	4,16	9,08	45,03	1,68

pH: água; P: Mehlich⁻¹; K: Mehlich⁻¹; Ca²⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; Mg²⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; Al³⁺: KCl 1,0 mol L⁻¹; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: capacidade de troca catiônica efetiva; T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio.

Fonte: A autora.

Tabela 10 – Quantidade de corretivo aplicado por unidade experimental na 1ª e 2ª semeadura

CALCÁRIO (g parcela ⁻¹)											
Granulometria	Material 1		Material 2		Material 3		Material 4		Material 5		
Plantio	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	
<0,297	10,68	17,92	10,80	18,12	9,49	15,91	9,06	15,20	9,18	15,39	
0,297-0,500	11,37	19,06	12,05	20,21	9,43	15,81	9,10	15,26	8,90	14,92	
0,50-0,84	11,87	19,91	14,12	23,68	9,65	16,19	9,00	15,09	9,15	15,34	
0,84-1,00	11,92	19,99	18,56	31,13	9,56	16,04	8,97	15,04	9,08	15,23	
1,00-1,70	12,05	20,21	28,01	46,98	9,76	16,37	9,24	15,49	9,27	15,55	

Fonte: A autora.

As semeaduras foram realizadas utilizando a variedade de sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) BM 750, que é recomendada para produção de grãos e silagem de grão úmido, possui ciclo precoce e arquitetura semiereta (Biomatrix, 2024). Os ensaios foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições e cada unidade experimental foi representada por três plantas acondicionadas na parte central do vaso. No momento da semeadura foi realizada a adubação da cultura utilizando superfosfato triplo (45% P₂O₅), cloreto de potássio (60% K₂O), sulfato de amônio (20% N) e MIB-3 (1,8% B; 0,8% Cu; 3% S; 2% Mn; 0,1% Mo e 9% Zn), conforme a recomendação para cultura. Dentro de cada vaso foram alocadas duas estacas de gotejadores utilizadas para manter a umidade durante o ciclo de cultivo, o turno de rega adotado foi de dois dias.

A primeira semeadura foi realizada em maio de 2024 e a emergência das plântulas ocorreu após cinco dias. Aos 12 e 41 dias após a emergência (DAE) foram realizadas as adubações de cobertura utilizando ureia (45% N) e cloreto de potássio (60% K₂O). Durante o ciclo da cultura foram realizadas duas aplicações foliares com sulfato de zinco (20% Zn), sulfato de manganês (31% Mn) e ácido bórico (17% B) aos 29 e 41 DAE a fim de suprir as deficiências visuais destes micronutrientes. Em relação ao manejo fitossanitário realizou-se a aplicação do inseticida Verdavis (150 g L⁻¹ Lambda-cialotrina

+ 100 g L⁻¹ Isocicloseram) aos 26 DAE a fim de controlar a cigarrinha do milho (*Dalbulus maidis*) e tripses. Aos 29 DAE foi feita a aplicação do fungicida Fox XPRO (125 g L⁻¹ Bixafem + 175 g L⁻¹ Protioconazol + 150 g L⁻¹ Trifloxistrobina) como medida protetiva ao aparecimento de doenças como ferrugens e manchas foliares. A colheita ocorreu durante a fase vegetativa, 56 dias após a semeadura (DAS), sendo descartado o sistema radicular das plantas e a parte aérea levada para secagem em estufa com temperatura controlada (60 °C) por quatro dias.

Em setembro de 2024 foi realizada a segunda semeadura, as plântulas emergiram após seis dias. Aos 10 e 32 dias após a emergência (DAE) foram realizadas as adubações de cobertura, com o mesmo manejo adotado na primeira semeadura. Durante o ciclo da cultura foram feitas duas aplicações de sulfato de cobre e do fungicida Fox XPRO como medida protetiva ao aparecimento de doenças como ferrugens e manchas foliares. Também foi feita uma aplicação foliar de micronutrientes aos 18 DAE, conforme manejo adotado na 1ª semeadura. Não foram necessárias aplicações de inseticida devido a não incidência de pragas. A colheita foi realizada aos 52 dias após semeadura, quando o sorgo estava no final da fase vegetativa, retirando apenas a parte aérea dos vasos. As folhas foram levadas para secagem seguindo a mesma metodologia adotada na primeira semeadura.

12.2 Variáveis analisadas

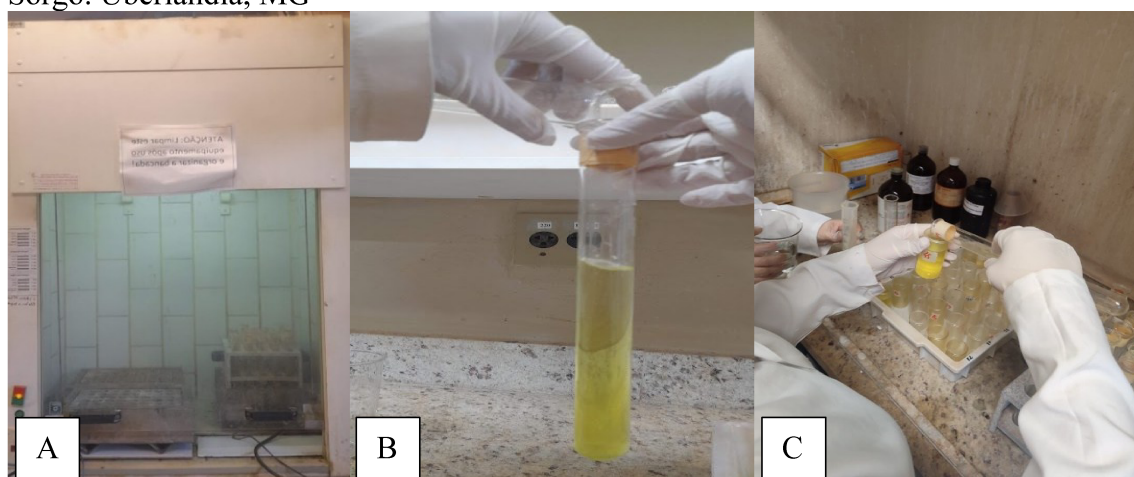
Foram avaliadas nestes ensaios as seguintes variáveis: massa seca da parte aérea, teores de cálcio e magnésio foliar, pH em água, pH em cloreto de cálcio, acidez potencial (H+Al), teores de cálcio e magnésio do solo após a semeadura. As análises foram desenvolvidas na Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Umuarama, no laboratório de Fertilizantes (LAFER).

A determinação dos teores de cálcio e magnésio (Figura 22) seguiram a metodologia do Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes (Silva *et al.*, 2009). Após a secagem das folhas utilizou-se o moinho para trituração e posteriormente o material foi armazenado em sacos plásticos para análise química. A digestão das amostras foi feita em sistema aberto (digestão úmida), sendo que a matéria orgânica do tecido vegetal é oxidada com ácidos minerais concentrados e a quente (Miyazawa *et al.*, 2009). Para extração destes macronutrientes foi utilizada a solução nitroperclórica, composta por ácido nítrico (HNO₃) e ácido perclórico (HClO₄) na proporção de 8:1.

Adicionou-se 0,5 gramas de cada amostra em um tubo digestor de 80 mL e posteriormente foram acrescentados 6 mL da solução nitroperclórica. A solução permaneceu a frio de um dia a outro e posteriormente foi colocada no bloco digestor para digestão em temperaturas reguladas para aquecimento até atingir 210 °C. Ao final, o tempo gasto no digestor é de três a quatro horas até cessar o desprendimento do vapor branco de ácido perclórico (Miyazawa *et al.*, 2009). Seguindo a metodologia proposta por estes autores, a determinação de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foi feita por espectrofotometria de absorção atômica (EAA) com equipamento calibrado a partir de soluções padrões de concentração conhecidas. Pipetou-se 1,0 mL do extrato após a digestão em um novo recipiente e adicionou-se 50 mL de água destilada morna. A partir desta nova solução foi pipetado 0,5 mL e adicionado a um copo plástico com 2,5 mL de óxido de lantânio (LaO_3) a 5% e 22 mL de água destilada. O resultado da leitura no equipamento foi obtido em g Kg^{-1} com chama ar-acetileno.

As análises de pH em água, pH em CaCl_2 , acidez trocável e teores de cálcio e magnésio no solo foram realizadas conforme metodologia proposta por Silva *et al.* (2009) e descrita no capítulo anterior. Para essa finalidade realizou-se uma amostragem do solo após a colheita do sorgo, utilizando um trado calador que foi posicionado no centro do vaso, coletando aproximadamente 400 g de solo de cada unidade experimental. As amostras foram conduzidas para secagem em estufa, peneiramento em malha de 2 mm, destorroamento e posterior análise química.

Figura 22 – Extração e determinação dos teores de cálcio e magnésio foliar na cultura do Sorgo. Uberlândia, MG



Legenda: A – Processo de extração via úmida de cálcio e magnésio. B e C – Etapas do processo de determinação dos teores de cálcio e magnésio foliares.

Fonte: A autora.

12.3 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos teste de normalidade dos resíduos e homogeneidade de variância, checados pelo teste Kolmogorov-Smirnov e Oneillmathews respectivamente, a 0,01 de significância. Após a análise de variância, quando diferenças significativas foram detectadas pelo teste F ($p\text{-valor} < 0,05$) para os fatores de estudo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. Para comparar o efeito dos tratamentos e da testemunha foi executado o teste de Dunnett. Todas as análises foram desenvolvidas no software R versão 4.4.3.

13 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentro das variáveis analisadas houve interação significativa entre os fatores de estudo apenas para o teor de magnésio no solo ($p\text{-valor}<0,01$) na 1ª semeadura e para o teor de magnésio foliar ($p\text{-valor}<0,01$) na 2ª semeadura. Para as variáveis onde a interação não foi significativa ($p\text{-valor}<0,05$) os fatores granulometria e tipo de calcário foram avaliados de forma independente.

A massa seca foliar da cultura do sorgo foi inferior nas parcelas que receberam aplicação do material 4 (21,14 g) na 1ª semeadura e se equiparou onde foram aplicados os materiais 1, 2, 3 e 5 com médias variando de 28,01 a 31,00 g (Tabela 11). Esse material pode ter proporcionado menor valor de massa seca devido a menor relação Ca:Mg presente na composição do material 4 (1,45:1,00), o que provavelmente influenciou no crescimento da parte aérea. A absorção e o transporte de Ca e Mg pelas plantas possuem similaridades, de modo que há competição pelos sítios de adsorção nas membranas celulares e o desbalanço entre estes cátions pode afetar o desenvolvimento vegetal em diferentes níveis (Li *et al.*, 2024). Ao estudar os efeitos do equilíbrio de cátions trocáveis Ca, Mg e K no crescimento de mudas de tomateiro, foi observado que o balanceamento destes cátions no solo promoveu aumento na massa seca das mudas quando comparado com solos desbalanceados (Yang *et al.*, 2024). E ao testar as relações Ca:Mg no cultivo de soja, Lange *et al.* (2021) observaram que a maior massa seca da parte aérea foi obtida com os tratamentos com proporção (Ca:Mg) de 5:1. Já na 2ª semeadura (Tabela 13) não houve diferenças a 0,05 de significância entre os corretivos estudados, as médias variaram entre 64,50 e 68,90 g. Os tratamentos não se diferiram em função da granulometria utilizada em nenhuma das semeaduras (Tabelas 12 e 14). Não houve variação significativa entre os tratamentos e a testemunha, que apresentou médias de 23,04 e 80,00 g na 1ª e 2ª semeadura, nessa ordem (Tabela 15 e 17). A não influência dos tratamentos na massa seca foliar pode ser explicada pela rusticidade e tolerância da cultura do sorgo. Para Silva *et al.* (2021) o sorgo possui tolerância à salinidade e acidez do solo, apresentando alta conversão de energia em biomassa seca, por unidade de área.

Na 1ª semeadura os materiais 1 (44,23% CaO e 7,68% MgO), 3 (55,58% CaO e 1,84% MgO) e 5 (46,17% CaO e 13,44% MgO) promoveram maior teor de Ca foliar em plantas de sorgo, com médias de 4,69; 4,59 e 4,27 g kg⁻¹, nessa ordem. Já o material 4 (34,62% CaO e 23,79% MgO) resultou em menor teor, com média de 3,26 g kg⁻¹, o que pode ser explicado pelo maior teor de MgO desse material (Tabela 11). Os autores Li *et*

al. (2024) observaram que o aumento nas concentrações de Mg resultou em decréscimo nos teores de Ca foliar na cultura do tomate, já que estes cátions são antagônicos e possuem correlação negativa, devido a competição pelos mesmos sítios de adsorção. Na 2ª semeadura, a aplicação dos materiais 2 (31,73% CaO e 20,26% MgO) e 4 (34,62% CaO e 23,79% MgO) resultou em médias inferiores aos tratamentos que receberam o material 1 (44,23% CaO e 7,68% MgO), com teores de 3,67; 3,76 e 4,67 g kg⁻¹ de Ca foliar, respectivamente. Os materiais 3 e 5 foram estatisticamente equivalentes aos demais, com médias de 3,99 e 4,03 g kg⁻¹ nesta ordem (Tabela 13). Os autores Lange *et al.* (2021) também observaram que para as culturas soja e milho os teores de Ca foliar foram superiores nos tratamentos em que o cálcio era mais abundante, o que resultou em maior acúmulo de Ca na planta. A finura dos materiais não influenciou nos teores de Ca foliar em nenhuma das semeaduras (Tabelas 12 e 14); para alguns autores as características relacionadas as propriedades químicas dos materiais podem exercer maior influência do que o tamanho da partícula (Soratto *et al.*, 2019). Ao comparar o efeito dos tratamentos com a testemunha (Tabela 15), observa-se que na 1ª semeadura os teores de Ca foliar das plantas que receberam o material 1 na granulometria de 0,840-1,000 mm foram superiores (5,77g kg⁻¹) ao tratamento controle (3,16g kg⁻¹).

Tabela 11- Média das variáveis massa seca foliar na cultura do sorgo (g), teor de cálcio e magnésio foliar na cultura do sorgo (g kg^{-1}), pH em água (H_2O) e pH em cloreto de cálcio (CaCl_2) do solo, acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em função de diferentes materiais para correção de acidez. 1ª Semeadura. Uberlândia, MG. 2025

MATERIAL	Massa seca foliar (g)**	Cálcio foliar (g kg^{-1})**	Magnésio foliar (g kg^{-1})**	pH H_2O	pH CaCl_2 **	H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	Teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)
1 (44,23% CaO e 7,68% MgO)	28,30a	4,69a	1,21b	4,61a	4,48b	3,81a	1,40a
2 (31,73% CaO e 20,26% MgO)	28,59a	3,98ab	1,86a	4,86a	4,88a	3,84a	1,44a
3 (55,58% CaO e 1,84% MgO)	28,02a	4,59a	0,78c	4,74a	4,64ab	3,83a	1,51a
4 (34,62% CaO e 23,79% MgO)	21,14b	3,26b	1,53ab	4,79a	4,69ab	3,84a	1,39a
5 (46,17% CaO e 13,44% MgO)	31,00a	4,27a	1,60a	4,85a	4,75ab	3,83a	1,35a
CV(%)	28,07	21,91	30,30	7,59	7,45	0,78	23,62

**significativo a 1% pelo teste F. As médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. CV (%) - Coeficiente de variação.

Fonte: A autora.

Tabela 12 - Média das variáveis massa seca foliar na cultura do sorgo (g), teor de cálcio e magnésio foliar na cultura do sorgo (g kg^{-1}), pH em água (H_2O) e pH em cloreto de cálcio (CaCl_2) do solo, acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em função de diferentes granulometrias de corretivos de acidez. 1ª Semeadura. Uberlândia, MG. 2025

GRANULOMETRIA (mm)	Massa seca foliar (g) ^{NS}	Cálcio foliar (g kg^{-1}) ^{NS}	Magnésio foliar (g kg^{-1}) ^{NS}	pH H_2O ^{NS}	pH CaCl_2 ^{NS}	H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) ^{NS}	Teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) ^{NS}
<0,297	28,39	4,35	1,27	4,63	4,56	3,83	1,33
0,297-0,500	25,61	3,93	1,58	4,76	4,75	3,83	1,43
0,500-0,840	26,73	3,99	1,51	4,89	4,79	3,83	1,52
0,840-1,000	26,53	4,46	1,34	4,78	4,63	3,83	1,40
1,000-1,700	29,79	4,08	1,3	4,79	4,72	3,83	1,41
CV(%)	28,07	21,91	30,30	7,59	7,45	0,78	23,62

CV(%) - Coeficiente de variação. NS= não significativo pelo teste F a 5% de significância.

Fonte: A autora.

Tabela 13 - Média das variáveis massa seca foliar na cultura do sorgo (g), teor de cálcio e magnésio foliar na cultura do sorgo (g kg^{-1}), pH em água (H_2O) e pH em cloreto de cálcio (CaCl_2) do solo, acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em função de diferentes materiais para correção de acidez. 2ª Semeadura. Uberlândia, MG. 2025

MATERIAL	Massa seca foliar (g) ^{NS}	Cálcio foliar (g kg^{-1}) ^{**}	pH H_2O ^{NS}	pH CaCl_2 ^{NS}	H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) ^{NS}	Teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) ^{NS}	Teor de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) ^{**}
1 (44,23% CaO e 7,68% MgO)	67,00	4,67a	5,67	5,1	3,61	3,63	0,58c
2 (31,73% CaO e 20,26% MgO)	64,50	3,67b	5,63	5,02	3,61	3,4	1,11a
3 (55,58% CaO e 1,84% MgO)	66,20	3,99ab	5,57	4,98	3,61	3,39	0,63bc
4 (34,62% CaO e 23,79% MgO)	66,75	3,76b	5,51	4,95	3,63	3,22	0,91ab
5 (46,17% CaO e 13,44% MgO)	68,90	4,03ab	5,59	5,03	3,57	3,12	0,85abc
CV(%)	22,80	24,61	5,24	5,75	2,14	24,99	45,03

^{**}significativo a 1% pelo teste F. NS= não significativo pelo teste F a 5% de significância. As médias seguidas pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. CV (%) - Coeficiente de variação.

Fonte: A autora.

Tabela 14 - Média das variáveis massa seca foliar na cultura do sorgo (g), teor de cálcio e magnésio foliar na cultura do sorgo (g kg^{-1}), pH em água (H_2O) e pH em cloreto de cálcio (CaCl_2) do solo, acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em função de diferentes granulometrias de corretivos de acidez. 2ª Semeadura. Uberlândia, MG. 2025

GRANULOMETRIA (mm)	Massa seca foliar (g) ^{NS}	Cálcio foliar (g kg^{-1}) ^{NS}	pH H_2O ^{NS}	pH CaCl_2 ^{NS}	H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) ^{NS}	Teor de cálcio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) ^{NS}	Teor de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) ^{NS}
<0,297	66,00	3,96	5,58	4,98	3,6	3,5	0,8
0,297-0,500	71,95	4,02	5,64	5,03	3,61	3,28	0,87
0,500-0,840	68,50	4,33	5,65	5,09	3,6	3,32	0,78
0,840-1,000	67,40	3,88	5,62	5,08	3,59	3,49	0,78
1,000-1,700	59,50	3,92	5,5	4,91	3,62	3,19	0,84
CV(%)	22,80	24,61	5,24	5,75	2,14	24,99	45,03

CV(%) - Coeficiente de variação. NS= não significativo pelo teste F a 5% de significância.

Fonte: A autora.

Tabela 15 - Resultados do Teste de Dunnett ao comparar a média dos tratamentos com a testemunha a 5% de significância para as variáveis massa seca foliar (g), cálcio foliar (g kg⁻¹), magnésio foliar (g kg⁻¹) e pH em H₂O. 1ª Semeadura de Sorgo. Uberlândia, MG. 2025

GRANULOMETRIA (mm)	MATERIAL																			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Massa seca foliar (g)					Cálcio foliar (g kg ⁻¹)					Magnésio foliar (g kg ⁻¹)					pH H ₂ O				
<0,297	25,85	33,11	25,54	23,78	33,67	4,73	3,92	4,25	3,66	*5,17	1,14	1,38	0,55	*1,52	*1,74	4,35	4,58	4,60	4,65	4,96
0,297-0,500	31,22	28,60	26,14	16,02	26,04	4,23	3,93	4,27	2,89	4,32	*1,59	*2,09	0,91	*1,70	*1,60	4,76	5,03	4,39	4,86	4,75
0,500-0,840	29,89	19,97	30,50	18,89	34,42	4,62	3,79	4,94	2,79	3,83	*1,46	*2,06	0,81	*1,46	*1,73	4,87	4,71	5,00	4,88	5,00
0,840-1,000	23,70	31,24	24,14	21,66	31,88	*5,77	3,91	4,59	3,76	4,25	0,99	*1,81	0,81	*1,57	*1,52	4,48	4,90	5,02	4,63	4,87
1,000-1,700	30,86	30,03	33,74	25,32	29,00	4,12	4,35	4,94	3,20	3,81	0,88	*1,98	0,84	1,41	1,41	4,60	5,07	4,70	4,94	4,67
TESTEMUNHA	23,04					3,16					0,53					4,39				
CV (%)	28,07					21,91					30,3					7,59				

CV(%) - Coeficiente de variação. * significativo a 0,05 de significância pelo teste de Dunnett.

Fonte: A autora.

Tabela 16 - Resultados do Teste de Dunnett ao comparar a média dos tratamentos com a testemunha a 5% de significância para as variáveis pH CaCl₂, acidez potencial (cmol_c dm⁻³), teor de cálcio e magnésio no solo (cmol_c dm⁻³). 1ª Semeadura de Sorgo. Uberlândia, MG. 2025

GRANULOMETRIA (mm)	MATERIAL																			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	pH CaCl ₂					Acidez Potencial (cmol _c dm ⁻³)					Teor de cálcio solo (cmol _c dm ⁻³)					Teor de magnésio solo (cmol _c dm ⁻³)				
<0,297	4,32	4,50	4,52	4,59	4,86	3,80	3,85	3,84	3,85	3,83	1,32	1,33	1,39	1,16	1,43	0,07	0,14	0,07	0,12	0,12
0,297-0,500	4,47	*5,45	4,39	4,78	4,65	3,83	3,84	3,80	3,83	3,82	1,30	1,53	1,47	1,45	1,39	*0,21	*0,26	0,06	*0,24	*0,21
0,500-0,840	4,69	4,69	4,91	4,82	4,87	3,81	3,82	3,85	3,84	3,83	1,50	1,37	*1,72	1,63	1,38	0,15	*0,37	0,07	*0,40	*0,34
0,840-1,000	4,43	4,79	4,73	4,44	4,77	3,80	3,84	3,85	3,82	3,84	1,25	1,41	1,59	1,35	1,39	0,09	*0,38	0,09	*0,30	*0,27
1,000-1,700	4,51	4,99	4,67	4,83	4,61	3,83	3,85	3,82	3,86	3,81	1,65	1,53	1,38	1,36	1,15	0,07	*0,35	0,08	*0,24	*0,24
TESTEMUNHA	4,31					3,85					0,99					0,05				
CV (%)	7,45					0,78					23,62					17,92**				

CV(%) - Coeficiente de variação. * significativo a 0,05 de significância pelo teste de Dunnett.

Fonte: A autora.

Tabela 17 - Resultados do Teste de Dunnett ao comparar a média dos tratamentos com a testemunha a 5% de significância para as variáveis massa seca foliar (g), cálcio foliar (g kg⁻¹), magnésio foliar (g kg⁻¹) e pH em H₂O. 2ª Semeadura de Sorgo. Uberlândia, MG. 2025

GRANULOMETRIA (mm)	MATERIAL																			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Massa seca foliar (g)					Cálcio foliar (g kg ⁻¹)					Magnésio foliar (g kg ⁻¹)					pH H ₂ O				
<0,297	53,75	72,50	73,75	66,25	63,75	4,92	3,58	3,44	3,29	4,59	3,16	2,50	2,06	2,17	2,19	5,77	5,45	5,48	5,59	5,61
0,297-0,500	72,50	60,00	73,50	75,00	78,75	3,43	4,52	4,44	3,82	3,91	2,07	2,77	2,52	3,07	2,26	5,87	5,66	5,56	5,49	5,64
0,500-0,840	66,25	61,25	71,25	75,00	68,75	5,31	3,27	4,30	4,91	3,88	2,99	2,41	2,17	2,61	1,95	5,55	5,67	5,69	5,68	5,64
0,840-1,000	77,50	66,25	57,50	57,50	78,25	4,73	3,51	3,75	3,71	3,69	2,60	2,44	1,99	2,35	1,54	5,55	5,63	5,71	5,69	5,49
1,000-1,700	65,00	62,50	55,00	60,00	55,00	4,97	3,46	4,02	3,07	4,06	1,85	2,77	1,89	1,83	3,03	5,62	5,75	5,41	5,13	5,57
TESTEMUNHA	80,00					4,09					2,26					5,61				
CV (%)	22,80					12,11					12,80					5,24				

CV(%) - Coeficiente de variação.

Fonte: A autora.

Tabela 18 - Resultados do Teste de Dunnett ao comparar a média dos tratamentos com a testemunha a 5% de significância para as variáveis pH CaCl₂, acidez potencial (cmol_c dm⁻³), teor de cálcio e magnésio no solo (cmol_c dm⁻³). 2ª Semeadura de Sorgo. Uberlândia, MG. 2025

GRANULOMETRIA (mm)	MATERIAL																			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	pH CaCl ₂					Acidez Potencial (cmol _c dm ⁻³)					Teor de cálcio solo (cmol _c dm ⁻³)					Teor de magnésio solo (cmol _c dm ⁻³)				
<0,297	5,03	4,84	4,91	4,98	5,11	3,57	3,60	3,62	3,65	3,58	3,59	3,47	3,48	3,28	3,69	0,62	*1,22	0,55	0,92	0,69
0,297-0,500	5,22	5,10	5,05	4,81	4,97	3,65	3,60	3,65	3,56	3,58	3,79	3,36	3,56	2,58	3,09	0,78	1,09	0,83	0,91	0,76
0,500-0,840	5,08	5,05	5,18	5,06	5,09	3,59	3,60	3,62	3,62	3,57	3,32	3,50	3,82	2,90	3,06	0,62	0,86	0,52	1,00	0,91
0,840-1,000	5,19	5,02	4,96	5,23	4,97	3,60	3,62	3,55	3,64	3,56	3,59	3,29	3,41	4,19	2,95	0,32	1,13	0,77	0,89	0,80
1,000-1,700	4,99	5,07	4,81	4,67	5,02	3,65	3,63	3,61	3,66	3,56	3,86	3,39	2,72	3,14	2,83	0,54	*1,27	0,47	0,85	1,08
TESTEMUNHA	5,00					3,59					3,57					0,35				
CV (%)	5,75					2,14					24,99					45,03				

CV(%) - Coeficiente de variação. * significativo a 0,05 de significância pelo teste de Dunnett.

Fonte: A autora.

Na 1ª semeadura do sorgo os teores de Mg foliar foram coerentes com a composição deste macronutriente em cada corretivo. O uso dos materiais 2 (31,73% CaO e 20,26% MgO), 4 (34,62% CaO e 23,79% MgO) e 5 (46,17% CaO e 13,44% MgO) resultou em médias de Mg foliar semelhantes, sendo de 1,86; 1,53 e 1,60 g kg⁻¹ nesta ordem e foram superiores ao uso do material 3 (55,58% CaO e 1,84% MgO), que apresentou média de 0,78 g kg⁻¹ (Tabela 11). As granulometrias <0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm não influenciaram nos teores de magnésio foliar, que foram semelhantes independente da fração granulométrica adotada, médias entre 1,27 e 1,58 g kg⁻¹ (Tabela 12).

Na 2ª semeadura houve interação entre os fatores de estudo para o teor de Mg foliar. Nas frações <0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840 e 0,840-1,000 mm não houve variações entre os materiais corretivos, mas na granulometria de 1,000-1,700 mm o material 5 (46,17% CaO e 13,44% MgO) resultou em maior acúmulo de Mg foliar quando comparado ao material 4 (34,62% CaO e 23,79% MgO), com valores médios de 3,03 e 1,83 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 19). Este resultado se difere do encontrado por Salvador *et al.* (2011), ao constatar que menores relações de Ca:Mg proporcionam maiores teores foliares de magnésio. Todavia é importante destacar que as plantas tendem a compensar o desbalanço do solo, minimizando os efeitos deletérios de discrepâncias nas relações entre esses nutrientes, o que pode explicar o aumento na concentração de Mg foliar apesar da maior relação entre Ca:Mg (Medeiros *et al.*, 2008).

Tabela 19 - Teor de magnésio foliar na cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) (g kg⁻¹) para cada granulometria em função de diferentes materiais de correção de acidez. Uberlândia, MG. 2025

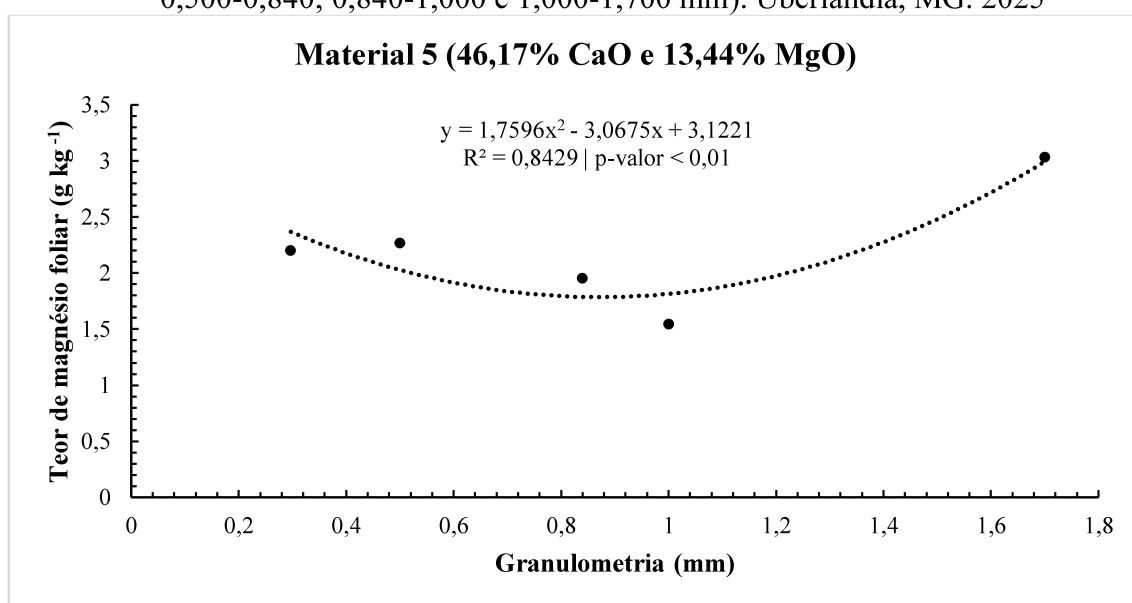
GRANULOMETRIA (mm)	TEOR DE MAGNÉSIO FOLIAR (g kg ⁻¹)**				
	MATERIAL 1	MATERIAL 2	MATERIAL 3	MATERIAL 4	MATERIAL 5
<0,297	3,163a	2,500a	2,065a	2,174a	2,199a
0,297-0,500	2,073a	2,775a	2,520a	3,067a	2,265a
0,500-0,840	2,999a	2,410a	2,173a	2,613a	1,951a
0,840-1,000	2,597a	2,443a	1,993a	2,347a	1,541a
1,000-1,700	1,848ab	2,772ab	1,890ab	1,833b	3,032a
CV(%)	12,80				

**significativo a 1% pelo teste F. As médias seguidas pela mesma letra na linha não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. CV (%) - Coeficiente de variação. Dados transformados pela \sqrt{X} .

Com relação ao acúmulo de Mg foliar dos materiais em função das frações granulométricas testadas, apenas os tratamentos com o material 5 apresentaram regressão significativa a 5% (Figura 23). Os teores de magnésio foliar foram decrescentes com o

aumento da fração granulométrica, todavia houve um incremento dos teores para as frações mais grosseiras (>1,0 mm). É possível inferir que com o uso do material 5 (46,17% CaO e 13,44% MgO) os corretivos de maior granulometria (>1,000 mm) apresentaram maior reação no solo, com maior absorção pelas plantas deste nutriente. De acordo com Rodighero *et al.* (2015) as frações de maior dimensão (0,840-2,000 mm) continuam reagindo no solo após um período de três meses, o que pode explicar a maior absorção pelas plantas após um período de quase 90 dias após a calagem. Possivelmente houve uma perda de nutrientes por lixiviação onde foi aplicado os materiais mais finos, e em um período de maior demanda da planta os materiais mais grosseiros apresentaram melhor aproveitamento.

Figura 23 - Equação quadrática do teor de magnésio foliar (g kg^{-1}) para cada material corretivo em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm). Uberlândia, MG. 2025



Fonte: A autora.

Os teores de Mg foliar dos tratamentos foram superiores à testemunha apenas na 1ª semeadura (Tabela 15), para o material 1 nas granulometrias 0,297-0,500 e 0,500-0,840 mm; para o material 2 nas granulometrias de 0,297-0,500 a 1,000-1,700 mm e os materiais 4 e 5 nas frações de <0,297 até 0,840-1,000 mm. O uso do material 3 não se diferenciou do tratamento controle, o que pode ser explicado pelos baixos teores deste elemento na composição do corretivo (1,84% MgO). Na 2ª semeadura não houve diferença significativa pelo teste de Dunnett a 5% de significância entre os tratamentos e a

testemunha (Tabela 17), o que pode ser justificado pelo maior teor natural deste macronutriente no solo ($1,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

O valor inicial do pH em água dos solos utilizados na 1ª e 2ª semeadura foram de 5,8 e 5,9 nesta ordem; após calagem, cultivo e colheita do sorgo as médias foram de 4,61 a 4,89 (solo 1ª semeadura) e de 5,51 a 5,67 (solo 2ª semeadura); ressalta-se que a redução do valor de pH foi menor na 2ª semeadura. As médias de pH em H_2O do solo após a 1ª e 2ª semeadura foram semelhantes para todos os tratamentos de acordo com o teste estatístico (Tabelas 11 e 13), não apresentando diferenças também com o tratamento controle (Tabelas 15 e 17). A absorção de nutrientes pelas plantas, a liberação de íons H^+ pelas raízes e uso de fertilizantes nitrogenados podem ter influenciado neste resultado, resultando em solos mais ácidos. O cultivo em vaso pode ter potencializado o efeito de acidificação, considerando o espaço restrito e maior concentração de íons; além da lixiviação das bases. As granulometrias e materiais não influenciaram nesta avaliação. Ao avaliar materiais com diferentes relações de cálcio e magnésio, Guimarães *et al.* (2013) também observaram que o pH do solo não foi afetado pela relação Ca:Mg.

Em relação ao pH em CaCl_2 (Tabelas 11 e 13) houve influência dos corretivos aplicados apenas na 1ª semeadura. Os solos que receberam calagem com o material 1 (44,23% CaO e 7,68% MgO) apresentaram maior acidez, pH CaCl_2 4,48, quando comparado aos que foram aplicados o material 2 (31,73% CaO e 20,26% MgO), média de pH CaCl_2 4,88. O tamanho de partículas dos calcários (mm) não influenciou no pH em CaCl_2 (Tabelas 12 e 14). De acordo com o teste de Dunnett (Tabelas 16 e 18) não houve variações significativas entre os tratamentos que receberam calagem e à testemunha, com exceção do material 2 na granulometria de 0,297-0,500 mm na 1ª semeadura, que apresentou média superior ao controle com pH em CaCl_2 de 5,45 e 4,31, respectivamente. Os autores Lange *et al.* (2021) narraram que o uso de fertilizantes nitrogenados, o balanço eletroquímico da absorção/extração e exportação de nutrientes para a cultura e a exsudação de H^+ pela rizosfera pode contribuir com a acidificação dos solos, o que justifica os solos que receberam calagem apresentarem pH em CaCl_2 equivalente ao tratamento controle.

Os valores de acidez potencial (H^+/Al) não se diferiram em função dos materiais estudados e dos graus de finura dos calcários (Tabelas 11, 12, 13 e 14). Os autores Guimarães Júnior *et al.* (2013) ao estudarem o efeito da relação Ca:Mg no solo sob cultivo de forrageiras relataram que a acidez potencial não foi afetada pela relação destes macronutrientes, assim como neste estudo. O tratamento controle se equiparou com os

que receberam aplicação da calagem em ambas as semeaduras (Tabelas 16 e 18). O valor inicial de H^+Al foi de $1,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no solo utilizado na primeira semeadura e após a colheita as médias variaram de $3,81$ a $3,84 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Esse aumento na acidez potencial é coerente com a redução dos valores de pH após o cultivo, que pode ter sido influenciado pela exportação pela cultura, liberação de H^+ pelas raízes, além do uso de fertilizantes e lixiviação dos nutrientes do solo. A acidez potencial inicial do solo utilizado na segunda semeadura foi de $4,99 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e após a colheita do sorgo as médias variaram entre $3,57$ e $3,63 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ o que induz a menor acidificação e manutenção dos efeitos da calagem; essa análise condiz com a menor redução dos valores de pH em água observados no solo da segunda semeadura.

A aplicação dos corretivos promoveu elevação dos teores cálcio nos solos utilizados na 1ª e 2ª semeadura; os teores iniciais eram de $1,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $2,48 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, nesta sequência. Após a colheita, os teores de Ca no solo variaram entre $1,33$ e $1,52 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (1ª semeadura) e $3,19$ a $3,63 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (2ª semeadura). A relação Ca:Mg dos materiais não influenciou nos teores de Ca no solo, apesar de ter influenciado na exportação deste elemento para parte aérea da planta (Tabelas 11 e 13); o tamanho de partícula também não interferiu nesta variável (Tabelas 12 e 14). Conforme exposto na Tabela 16, o uso do material 3 na fração de $0,500$ - $0,840 \text{ mm}$ resultou em média superior de Ca no solo ($1,72 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) comparado ao tratamento controle ($0,99 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Após a 1ª semeadura os teores de magnésio no solo foram influenciados pela interação entre materiais e granulometria (Tabela 20 e Figura 24). Na fração de $0,297$ - $0,500 \text{ mm}$ os tratamentos com o material 3 ($55,58\%$ CaO e $1,84\%$ MgO) apresentaram menor teor de Mg no solo, com média de $0,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; já nas frações de $0,500$ - $0,840$; $0,840$ - $1,000$ e $1,000$ - $1,700 \text{ mm}$ os materiais 1 ($44,23\%$ CaO e $7,68\%$ MgO) e 3 ($55,58\%$ CaO e $1,84\%$ MgO) resultaram em médias inferiores aos demais corretivos (Tabela 20). O teor de Mg no solo foi coerente com a porcentagem deste elemento nos corretivos; além deste fato, aliado à menor reatividade das partículas mais grossas o aumento da saturação do solo por cálcio pode causar desequilíbrio de outros cátions como o Mg^{2+} . Há competições entre o Ca e Mg pelos sítios de adsorção, sendo que o cálcio apresenta maior força de atração em relação ao magnésio no complexo de troca (Yadave; Girdhar, 1981).

As regressões foram significativas para os materiais 2, 4 e 5 e estão apresentadas na Tabela 21. O teor de Mg no solo se comportou de forma quadrática, aumentou até um certo ponto e em seguida, reduziu com o aumento do tamanho da partícula, conforme exposto na Figura 24. Esse resultado era esperado, tendo em vista maior teor de MgO

nesses materiais e que com o aumento da granulometria há uma redução na superfície de contato com o solo, que pode resultar em menor reatividade dos corretivos.

Tabela 20 - Teor de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) por fração granulométrica em função de diferentes materiais de correção de acidez. Uberlândia, MG. 2025

GRANULOMETRIA (mm)	TEOR DE MAGNÉSIO NO SOLO ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)**				
	MATERIAL 1	MATERIAL 2	MATERIAL 3	MATERIAL 4	MATERIAL 5
<0,297	0,072a	0,142a	0,067a	0,125a	0,120a
0,297-0,500	0,210a	0,260a	0,062b	0,242a	0,212a
0,500-0,840	0,152b	0,367a	0,070b	0,465a	0,342a
0,840-1,000	0,092b	0,382a	0,087b	0,305a	0,275a
1,000-1,700	0,075b	0,355a	0,077b	0,240a	0,237a
CV(%)	17,92				

**significativo a 1% pelo teste F. As médias seguidas pela mesma letra na linha não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 0,05 de significância. CV (%) - Coeficiente de variação. Dados transformados pela \sqrt{X} .

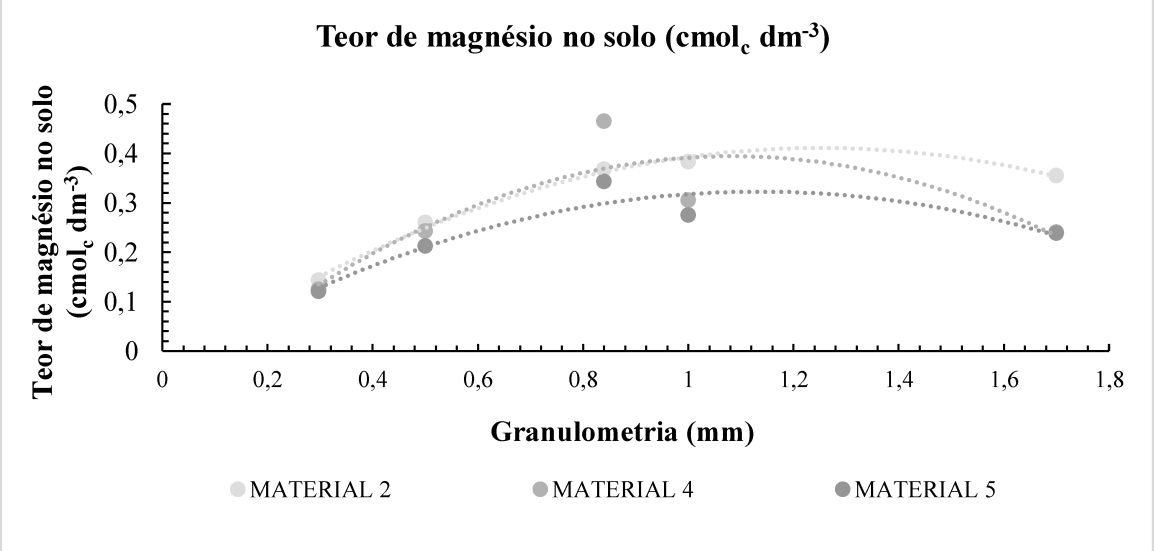
Tabela 21 - Equação quadrática do teor de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) para cada material corretivo em função de diferentes granulometrias (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm). Uberlândia, MG. 2025

MATERIAL	Equação polinomial quadrática	R ²
2 (31,73% CaO e 20,26% MgO)	$y = -0,2864x^2 + 0,717x - 0,0378^*$	0,9924
4 (34,62% CaO e 23,79% MgO)	$y = -0,4238x^2 + 0,917x - 0,1017^*$	0,7282
5 (46,17% CaO e 13,44% MgO)	$y = -0,2788x^2 + 0,632x - 0,0359^*$	0,8576

*significativo a 1% pelo teste F. R²= coeficiente de determinação.

Fonte: A autora.

Figura 24 – Teor de magnésio no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) dos materiais 2, 4 e 5 em função do tamanho de partícula (<0,297; 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm)



Fonte: A autora.

Na 2ª semeadura não houve interação entre os fatores de estudo, e ao serem avaliados de forma independente apenas os corretivos influenciaram na manifestação do teor de Mg no solo (Tabela 13). Os materiais 1 e 3 resultaram em médias inferiores (0,58 e 0,63 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) ao material 2 (1,11 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), devido menor teor de Mg em suas composições. Houve uma relação direta entre o teor de MgO do calcário e o teor de Mg no solo.

Quando comparado à testemunha (0,05 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) os teores de Mg no solo após a 1ª semeadura foram superiores na fração de 0,297-0,500 mm para o material 1 (0,21 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e para os corretivos 2, 4 e 5 nas frações de 0,297-0,500; 0,500-0,840; 0,840-1,000 e 1,000-1,700 mm, com médias entre 0,21 e 0,46 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Tabela 16). Na 2ª semeadura, em decorrência dos maiores teores de Mg do solo antes da calagem, não houve diferenças significativas entre os tratamentos e à testemunha (0,35 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), exceto para o material 2 nas frações de <0,297 e 1,000-1,700 mm (1,22 e 1,27 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Tabela 18).

14 CONCLUSÃO

Os materiais com maior relação Ca:Mg proporcionaram aumento no teor de massa seca do sorgo (g) na primeira semeadura, e o tamanho de partícula do corretivo não influenciou nessa variável. De modo geral, os teores de Ca e Mg foliar na cultura do sorgo foram proporcionais à concentração destes elementos na composição de cada corretivo. Não houve influência dos materiais e da granulometria nos valores de pH em H₂O, acidez potencial (H⁺Al) e nos teores de cálcio no solo (cmol_c dm⁻³). Na 1ª semeadura o pH em CaCl₂ variou apenas em função do corretivo utilizado. Os corretivos com maior concentração de MgO proporcionaram maior teor deste elemento no solo (cmol_c dm⁻³) e o aumento da granulometria (mm) provocou redução nos teores de Mg no solo para a maioria dos materiais na 1ª semeadura.

A granulometria dos corretivos não foi determinante para a maioria das variáveis de produção do sorgo e para os atributos químicos do solo após a semeadura. Os materiais com diferentes concentrações de cálcio e magnésio não promoveram muitas alterações nos valores de pH e acidez potencial do solo.

REFERÊNCIAS

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: Características e interpretações técnicas**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 24 p, 2005. Disponível em: https://anda.org.br/wp-content/uploads/2019/03/boletim_06.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

BELLINGIERI, P. A.; SOUZA, E. C. A.; ALCARDE, J. C.; SHIKASHO, H. W. Importância da reatividade do calcário sobre a produção e algumas características da cultura da soja. **Scientia Agricola**, v. 49, n. 1, p. 61-71, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90161992000400010>. Acesso em: 28 mar. 2024.

BIOMATRIX. **Nossos produtos**: sementes Biomatrix. 2024. Portal. Disponível em: <https://sementesbiomatrix.com.br/produtos/bm-750>. Acesso em: 25 set. 2024.

GUIMARÃES JÚNIOR, M. P. A.; SANTOS, A. C, dos.; SANTOS, A, dos.; OLIVEIRA, L. B. T, de.; RODRIGUES, M. O. D.; MARTINS, A. D. Relação Ca:Mg do corretivo da acidez do solo e as características agronômicas de plantas forrageiras. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 14, n. 3, p. 460-471, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1519-99402013000300005>. Acesso em: 01 abr. 2025.

JUCOSKI, G. O.; CAMBRAIA, J.; RIBEIRO, C.; OLIVEIRA, J. A, de. Excesso de ferro sobre o crescimento e a composição mineral em *Eugenia uniflora* L. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 4, p. 720-728, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160086>. Acesso em: 28 mar. 2024.

LANGE, A.; CAVALLI, E.; PEREIRA, C. S; CHAPLA, M. V.; FREDDI, O. S. Relações cálcio:magnésio e características químicas do solo sob cultivo de soja e milho. **Nativa**, v. 9, n. 3, p. 294-301, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i3.11526>. Acesso em: 03 abr. 2025.

LI, H.; LIU, F.; ZHANG, X.; GAO, J.; CHEN, P. Magnesium deficiency or excess hinders tomato growth, potassium and calcium uptake. **Plant, Soil and Environment**, v. 70, n. 11, p. 719-730, 2024. Disponível em: 10.17221/473/2023-PSE. Acesso em: 02 jun. 2025.

MATSUMOTO, S.; SHIMADA, H.; SASAOKA, T.; MIYAJIMA, I.; KUSUMA, G. J.; GAUTAMA, R.S. Effects of Acid Soils on Plant Growth and Successful Revegetation in the Case of Mine Site. In: OSHUNSANYA, S. **Soil pH for Nutrient Availability and Crop Performance**. 2017. Acesso em: 28 mar. 2024.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; ROSA, J. D.; GATIBONI, L. C. Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 4, p. 799-806, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2008v29n4p799>. Acesso em: 04 abr. 2025.

MERLOTTO, Gabriel Rodrigo. **Solubilidade e reatividade de calcários sedimentares e metamórficos**. 2024. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, IAC, Campinas, 2024. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstitutoposgraduacao/repositorio/storage/teses_disser_tacoes/Gabriel_Rodrigo_Merlotto.pdf. Acesso em: 23 out. 2024.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S, do.; MELO, W. J, de. Análise química de tecido vegetal. *In*: SILVA, F.C, da.; *et al.* **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 192. 2009. Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>. Acesso em: 25 set. 2024.

MORAES, Flávio Araújo de. **Doses de calcário na construção da fertilidade do perfil do solo**. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, 2019. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/34445/2/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Doses%20de%20calc%C3%A1rio%20na%20constru%C3%A7%C3%A3o%20da%20fertilidade%20do%20perfil%20do%20solo.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

PANDOLFO, C. M.; TEDESCO, M. J. Eficiência relativa de frações granulométricas de calcário na correção da acidez do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 31, n. 10, p. 753-758, 1996. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/viewFile/4545/1831>. Acesso em: 28 mar. 2025.

RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150036>. Acesso em: 01 abr. 2025.

RODRIGUES, M.; SILVEIRA, C. A. P.; VAHL, L. C. Efeito da aplicação de calcário e subproduto da exploração de calcário sobre o pH, Ca e Mg do solo e na produção de massa seca do milho. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, Ilhéus, 2016. **Anais Eletrônicos** [...]. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1078688/1/CarlosAugusto9Livrorochagem.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SALVADOR, J. T.; CARVALHO, T. C.; LUCCHESI, L. A. C. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 9, n. 1, p. 27-32, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.7213/cienciaanimal.v9i1.11060>. Acesso em: 03 abr. 2025.

SANTOS, J. P. A. S.; SILVA, J. O. N, da.; SALVADOR, K. R. S.; GUERRA, T. M.; JARDIM, A. M. R. F.; *et al.* Eficiência bioeconômica da adubação mineral na cultura do sorgo. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35912>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SILVA, C. J. C, da.; SANTOS, R. L, dos.; SILVA, J. L. F, da.; PEREIRA, M. J.; *et al.* Uso do gesso agrícola na disponibilidade de nutrientes e desenvolvimento de sorgo

(*Sorghum bicolor* L. Moench). **Geama**, v. 7, n. 1, p. 44-51, 2021. Disponível em: <https://journals.ufpr.br/index.php/geama/article/view/3461/482484066>. Acesso em: 01 abr. 2025.

SILVA, F. C, da.; *et al.* **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 192. 2009. Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>. Acesso em: 25 set. 2024.

SILVA, L. M, da.; BERTI, M. P. S. Manganês no solo e nas plantas: uma revisão. **Scientific Eletronic Archives**, v. 15, n. 3, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.36560/15320221512>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SILVA, Yane Gama da. **Desenvolvimento do sorgo (*Sorghum bicolor* L.) irrigado com diferentes fontes de água na presença e ausência de adubação orgânica**. 2021. Monografia (Licenciatura em Ciências Agrárias) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, IFTM, Senhor do Bonfim, 2021. Disponível em: <https://www.ifbaiano.edu.br/unidades/bonfim/files/2023/06/Antonio-TCC-Yane-Gama-da-Silva.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, A. M.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; VITTI, G. C. Reactivity of sedimentary and metamorphic limestones of different particle sizes under controlled conditions. **Communications in soil Science and plant Analysis**, v. 50, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566920>. Acesso em: 02 jun. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 6 ed, 2017. Acesso em: 28 mar. 2025.

YADAV, J.; GIRDHAR, I. The effects of different magnesium:calcium ratios and sodium adsorption ratio values of leaching water on the Properties of calcareous versus noncalcareous soils. **Soil Science**, v. 131, n. 3, p. 194, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/00010694-198103000-00010>. Acesso em: 04 abr. 2025.

YANG, M.; ZHOU, D.; HANG, H.; CHEN, S.; LIU, H.; SU, J.; LV, H.; JIA, H.; ZHAO, G. Effects of Balancing Exchangeable Cations Ca, Mg, and K on the Growth of Tomato Seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) Based on Increased Soil Cation Exchange Capacity. **Agronomy**, v. 14, n. 3, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14030629>. Acesso em: 02 jun. 2025.