

ELTON EDUARDO NOVAIS ALVES

**EFEITO DO METASSILICATO DE CÁLCIO NAS PROPRIEDADES
QUÍMICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO CULTIVADO
COM ARROZ E FEIJÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A474e
2014

Alves, Elton Eduardo Novais, 1989-
Efeito do metassilicato de cálcio nas propriedades químicas
de um latossolo vermelho-amarelo cultivado com arroz e feijão /
Elton Eduardo Novais Alves. – Viçosa, MG, 2014.
xii, 92f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Renildes Lúcio Ferreira Fontes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Solos - Acidez. 2. Arroz - Cultivo. 3. Feijão - Cultivo.
4. Silício. 5. Corretivo de acidez. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-graduação em
Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.42

ELTON EDUARDO NOVAIS ALVES

**EFEITO DO METASSILICATO DE CÁLCIO NAS PROPRIEDADES
QUÍMICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO CULTIVADO
COM ARROZ E FEIJÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2014

Leonardus Vergütz

Alisson Carraro Borges

Liovando Marciano da Costa
(Coorientador)

Renildes Lúcio Ferreira Fontes
(Orientador)

Aos meus amados pais José Cézar e Ana Maria,

Aos meus irmãos, familiares e amigos,

À minha linda namorada Mariana Reis

À todos os professores que passaram por minha vida

Dedico!

“Estamos aí! Diante de um mundo extraordinariamente competente para te entristecer, mas, aqui e ali, também capaz de proporcionar grandes alegrias, grandes surpresas, momentos que você nunca mais gostaria que acabassem. São esses momentos que a gente persegue e que farão da vida sempre alguma coisa digníssima de ser buscada e fantástica de ser vivida.”

Prof. Dr. Clovis de Barros Filho

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pelo acolhimento desde a minha graduação e pelos sete anos aqui bem vividos

Ao Departamento de Solos da UFV e ao Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao professor Ph.D. Renildes Lúcio Ferreira Fontes, pela orientação, disposição, apoio na realização da pesquisa e pelos conhecimentos à mim passados.

Ao professor D.Sc. Júlio Cesar Lima Neves pela coorientação, principalmente no início do mestrado e valioso auxílio estatístico e sugestões durante a escrita da dissertação.

Ao professor Ph.D. Liovando Marciano da Costa pelas inúmeras horas de conversa em seu gabinete, por sempre me apoiar e me incentivar em alguns momentos frustrantes e pelo valiosíssimo conhecimento compartilhado. E por ser essa pessoa incrível de conviver e de gerar ideias e discussões que sempre acrescentam na vida profissional e pessoal.

Ao Professor D.Sc. Leonardus Vergütz pelos momentos de discussão, conversas, por aceitar de prontidão o convite para a banca de defesa e por suas valiosas sugestões para a melhoria deste trabalho.

Ao professor D.Sc. Alisson Carraro Borges, pelos anos de convivência e aprendizado durante o período de iniciação científica no Departamento de Engenharia Agrícola, os quais foram muito proveitosos, e por aceitar o convite para a participação na banca de defesa.

Aos professores do Departamento de Solos, pela atenção recebida e pela participação em minha formação que levarei para toda vida.

À todos os funcionários do Departamento de Solos que contribuíram para a realização deste trabalho e convivência do dia-a-dia, em especial aos laboratoristas,

Carlos Fonseca, Paulo, Cláudio, Lula, Luiz Fernando, Jorge, Beto, Carlinhos, Edimaldo, Mário e demais;

À secretária do PPG-SNP, Luciana, pela competência, agilidade e simpatia. E demais secretárias do DPS.

Ao Engenheiro Agrônomo Antônio Lopes, pelos ensinamentos e momentos de convívio durante a oportunidade de estágio ao final de minha graduação e sugestões no meu mestrado.

Aos colegas de Pós-Graduação da UFV pelos momentos compartilhados e convívio no dia-a-dia, em especial ao Evair Siebeneichler pelos inúmeros momentos de conversas, discussões e sugestões durante o trabalho. Aos amigos de pós-graduação Fernanda Schulthais, Wedisson, Fernando, Rafael Valadares, Rafael Teixeira, Lucas Ávila, Thaís Leal, Roberto, Pablo, Guilherme, Gustavo, Luiz Rogério, Samuel, Gelton, Silmara, Nicolás, Nayara, enfim à todos.

Aos estagiários Thales Fonseca e Marcos Resende pela valiosa ajuda durante a condução do experimento em casa de vegetação e análise químicas em laboratório.

Aos meus familiares, cunhadas e agregados por todos os momentos alegres que passamos juntos e por serem minha válvula de escape nos momentos mais tensos. Ao meu vô Célio, in memoriam, pelos ótimos momentos de conversas e pela sua simplicidade como homem.

Aos meus amados pais Ana Maria e José César pela educação e por me apoiarem em meus estudos, não medindo esforços e sendo fortes desde minha saída de casa aos 14 anos de idade para buscar meu primeiro diploma de Técnico Agrícola, o qual dedico totalmente a vocês, assim como o diploma de Engº. Agrônomo, o de Magister Scientiae, e futuramente o de Doctor Scientiae em Solos e Nutrição de Plantas. Muito obrigado por serem pais tão incríveis e amáveis, amo-lhes do fundo do meu coração.

À minha Lindona, Teti ou simplesmente Mariana Reis, a quem amo e desejo passar toda a minha vida ao seu lado, pelos momentos alegres e por me apoiar em momentos estressantes. Sabemos como foi trabalhoso passarmos esses dois anos pelo nosso mestrado, mas sem você tudo seria mais difícil, menos alegre e cinza. Obrigado por entrar em minha vida, amo-te.

Aos amigos da minha cidade, aos quais me desculpo por todo tempo ausente. E a galera de PD da republica Lucas, Heitor, Raoni, Felipe, Gordo (PM), Ronildo, Cavalo, Espeto, Pedro e Raphael.

Enfim, à todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho ou por participarem de momentos especiais em minha vida.

BIOGRAFIA

ELTON EDUARDO NOVAIS ALVES, filho de José Cézar de Novais Alves e Ana Maria Gonçalves Alves, nasceu em 25 de junho de 1989, na Cidade de Santa Bárbara, MG, sendo o caçula de quatro irmãos. Coursou até a quinta série na Escola Estadual de Barra Feliz, ensino fundamental no Colégio Nossa Senhora do Sagrado Coração e ensino médio na Escola Agrotécnica Federal de São João Evangelista-MG, atual IFMG campus São João Evangelista, formando-se como Técnico Agrícola com Habilitação e Agropecuária em dezembro de 2006.

Em 2007, com 17 anos, ingressou no curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa-MG obtendo-se o título de Engenheiro Agrônomo em janeiro de 2012. Em março deste mesmo ano iniciou o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa-MG, sendo aprovado para o curso de Doutorado no mesmo programa, com início em março de 2014.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
LITERATURA CITADA	4
CAPÍTULO I - Fator de Correção do Poder Neutralizante do Metassilicato de Cálcio para Recomendação como Corretivo da Acidez do Solo	6
RESUMO	6
INTRODUÇÃO.....	8
MATERIAL E MÉTODOS.....	10
Correção da acidez de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) com CaCO_3 e CaSiO_3	10
RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
Correção da acidez do LVAd com CaCO_3 e CaSiO_3	13
Poder neutralizante do CaSiO_3	19
Titulação potenciométrica de misturas $\text{CaSiO}_3\text{-HCl}$ e $\text{CaCO}_3\text{-HCl}$, com NaOH	20
Polimerização do H_4SiO_4	21
CONCLUSÕES	24
LITERATURA CITADA	25
CAPÍTULO II - Influência do Metassilicato de Cálcio na Correção da Acidez e na Mobilidade de Elementos em um Latossolo Cultivado com Arroz e Feijão.....	27
INTRODUÇÃO.....	27
MATERIAL E MÉTODOS.....	29
Análise Estatística.....	33
RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
Potencial Hidrogeniônico (pH).....	35
Acidez Trocável (Al^{3+})	38
Cálcio Trocável (Ca^{2+}).....	39
Magnésio Trocável (Mg^{2+})	43
Potássio Disponível (K).....	44
Silício Extraído por Ácido Acético (Si-HAc).....	47
CONCLUSÕES	48
LITERATURA CITADA	49
CAPÍTULO III - Influência do Metassilicato de Cálcio no Crescimento e Acúmulo de Elementos Químicos em Arroz e Feijão Cultivados em um Latossolo.....	53
INTRODUÇÃO.....	53
MATERIAL E MÉTODOS.....	56

Análise Estatística.....	57
RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
Crescimento das plantas.....	59
Teor e Conteúdo Foliar de Elementos Químicos nas Plantas de Arroz e Feijão	65
Silício (Si)	65
Alumínio (Al).....	70
Nitrogênio (N).....	71
Cálcio (Ca)	73
Ferro (Fe)	73
Manganês (Mn)	74
Magnésio (Mg) e Potássio (K)	76
CONCLUSÕES.....	77
LITERATURA CITADA.....	78
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
APÊNDICE	81

RESUMO

ALVES, Elton Eduardo Novais, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014. **Efeito do metassilicato de cálcio nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com arroz e feijão.** Orientador: Renildes Lúcio Ferreira Fontes. Coorientadores: Liovando Marciano da Costa e Júlio César Lima Neves.

O metassilicato de cálcio (CaSiO_3) e o carbonato de cálcio (CaCO_3) corrigem a acidez do solo reagindo de forma similar quando aplicados em quantidades equivalentes, sendo o CaCO_3 considerado o corretivo padrão com valor neutralizante igual a 100 %. No Capítulo I, foi avaliada a eficiência do CaSiO_3 na correção da acidez do solo em relação ao CaCO_3 . Foram ajustadas curvas de neutralização da acidez para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) a partir da incubação de amostras de 200 g do LVAd com a adição de doses de CaSiO_3 e CaCO_3 P.A. A incubação ocorreu durante 15 dias, mantendo-se a mistura solo-corretivo com 73 % do equivalente de umidade do solo. Após a incubação foram ajustadas regressões polinomiais dos dados de pH das misturas solo- CaSiO_3 e solo- CaCO_3 em função das doses de cada corretivo aplicado. O CaSiO_3 corrigiu, no máximo, 75 % da acidez em comparação ao CaCO_3 (64,5 % em equivalente de CaCO_3), sendo que este valor tendeu a diminuir com o aumento do pH do solo. A eficiência de 75 % do CaSiO_3 representa a eficiência teórica levando-se em consideração as reações químicas de polimerização do H_4SiO_4^0 que ocorrem quando o CaSiO_3 é adicionado ao solo. Essa reação de polimerização é responsável pelo menor poder de neutralização do CaSiO_3 comparado ao CaCO_3 . Na polimerização são formados polímeros de Si com baixo pK_a , havendo a liberação de H^+ que diminui a eficiência do CaSiO_3 na correção da acidez do solo. A titulação de uma mistura CaSiO_3 -HCl (titulação após 16 horas de reação) com NaOH mostrou intensa reação de polimerização do H_4SiO_4^0 . Nos Capítulos II e III foram avaliadas a efetividade do CaSiO_3 na neutralização da acidez do solo em profundidade e na mobilidade de elementos químicos no perfil do solo, assim como seu efeito na nutrição e crescimento das plantas de uma cultura acumuladora de Si (arroz) e de uma não acumuladora (feijão). O experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados com três repetições, no esquema de parcelas subdivididas, combinando-se três corretivos (CaSiO_3 , CaCO_3 e CaSO_4) e duas culturas (arroz e feijão) nas parcelas, e as oito profundidades nas subparcelas. As plantas de arroz e feijão cresceram em tubos de PVC preenchidos com o LVAd em casa de vegetação, irrigando-se a cada 3 d com água equivalente a uma chuva torrencial de 45 mm. Após 38

dias de crescimento, as plantas foram colhidas e amostras do solo e das raízes foram coletadas em oito profundidades (a cada 5 cm) na camada de 0 a 40 cm de solo. Foi medida a área das folhas, a biomassa da parte aérea e radicular e realizada a análise química de amostras das folhas e do solo. Os dados foram analisados por meio de contrastes (teste F, com $\alpha = 1, 5$ e 10%). As reações do CaSiO_3 e CaCO_3 não diferiram quanto à correção do pH e neutralização do Al^{3+} em profundidade. A movimentação do Ca^{2+} e Mg^{2+} foi proporcionalmente maior ao se aplicar o CaSO_4 e o CaCO_3 movimentou mais Ca^{2+} e menos Mg^{2+} que CaSiO_3 . No solo cultivado com feijão, o CaSiO_3 promoveu maior mobilidade do Mg^{2+} que o CaCO_3 , não havendo diferença quando cultivado com arroz. Houve aumento expressivo na disponibilidade de Si ao se aplicar CaSiO_3 , entretanto a mobilidade do Si no solo foi baixa. CaCO_3 e CaSiO_3 mostraram eficiências semelhantes quanto à correção da acidez. A aplicação do CaSiO_3 em comparação ao CaCO_3 mostrou vantagens quanto ao crescimento da massa da parte aérea das plantas de arroz e feijão, e distribuição das raízes no solo. A associação do CaSO_4 com os corretivos de acidez, principalmente o CaSiO_3 , favoreceu o maior crescimento das raízes de feijão em profundidade. Mesmo não sendo uma planta acumuladora de Si, o feijão apresentou conteúdo de Si semelhante ao do arroz, quando houve alta disponibilidade de H_4SiO_4 no solo. Os elementos metálicos, como o Al, Fe e Mn, foram fortemente influenciados pelo H_4SiO_4 no solo e na planta, com diminuição dos teores e conteúdo nos tecidos vegetais, principalmente na espécie acumuladora de Si. Isso destaca o papel importante do CaSiO_3 na minimização dos possíveis efeitos tóxicos desses elementos metálicos nas plantas, não apenas pelo efeito do pH, mas também pela associação desses elementos com as diversas formas de Si amorfo (sílica) no solo e na planta.

ABSTRACT

ALVES, Elton Eduardo Novais, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2014. **Effect of calcium metasilicate on the chemical properties of an Oxisol cultivated with rice and beans.** Adviser: Renildes Lúcio Ferreira Fontes. Co-Advisers: Liovando Marciano da Costa and Júlio César Lima Neves.

The calcium metasilicate (CaSiO_3) and calcium carbonate (CaCO_3) corrects the acidity of the soil and react similarly when applied in equivalent amounts, and the CaCO_3 is considered the standard corrective with neutralizing value of 100 %. In Chapter I, the efficiency of CaSiO_3 in correction of soil acidity in relation the CaCO_3 was evaluated. The acidity neutralization curves for Oxisol (LVAd) were adjusted from the incubating samples of 200 g of LVAd with addition doses of PA CaCO_3 and CaSiO_3 . Incubation occurred for 15 days, keeping the soil – corrective mixture with 73 % of the soil moisture equivalent. After incubation, polynomial regression were adjusted from pH data of the mixtures of the soil- CaSiO_3 and soil - CaCO_3 as a function of the doses of each material applied. The CaSiO_3 corrected up to 75 % of the acidity in comparison with CaCO_3 (64.5 % CaCO_3 equivalent), and this value tends to decrease with the increase of the soil pH. The efficiency of 75 % CaSiO_3 is the theoretical efficiency taking into consideration the chemical polymerization reactions of the H_4SiO_4^0 that occur when the CaSiO_3 is added to the soil. This polymerization reaction is responsible for the minor neutralization power of CaSiO_3 compared to CaCO_3 . In the polymerization of Si polymers with low pKa are formed, with the release of H^+ which decreases the efficiency of CaSiO_3 in correcting soil acidity. Titration of a mixture CaSiO_3 - HCl (titration after 16 hours of reaction) with NaOH showed intense reaction of polymerization of H_4SiO_4^0 . In the Chapters II and III, the effectiveness of CaSiO_3 were evaluated in neutralizing soil acidity in depth and mobility of elements chemicals in the soil profile as well as its effect on plant growth and nutrition of an accumulator culture Si (rice) and a non-accumulator (beans). The experiment was arranged in a randomized block design with three replications in a split plot design, combining three correctives (CaSiO_3 , CaCO_3 and CaSO_4) and two crops (rice and beans) to the plots and the subplots was eight depths. The rice and beans were grown in PVC tubes filled with the LVAd in a greenhouse, irrigating every 3 days with the equivalent of a downpour of 45 mm water. After 38 days of growth, the plants were harvested and samples of soil and roots were collected in eight depths (every 5 cm) in the 0 to 40 cm of soil. The leaf area, biomass of shoots and roots was measured and performed

the chemical analysis of samples of leaves and soil. The dates were analyzed using contrasts (F test with $\alpha = 1, 5$ and 10%). The reactions of CaCO_3 and CaSiO_3 no differences for pH correction and neutralization of Al^{3+} in depth. Changes in Ca^{2+} and Mg^{2+} was proportionally larger when applying CaSO_4 and CaCO_3 handled more Ca^{2+} and less Mg^{2+} than CaSiO_3 . In soil cultivated with beans, CaSiO_3 promoted increased mobility of the Mg^{2+} that CaCO_3 , with no difference when cultivated with rice. There was a significant increase in the availability of Si to apply CaSiO_3 , however the mobility of the Si in the soil was low. CaCO_3 and CaSiO_3 showed similar efficiencies as the liming. The application of CaSiO_3 compared to CaCO_3 showed advantages for growth of the mass of the shoots of rice and beans, and root distribution in the soil. The association of CaSO_4 with alkaline compounds, mainly CaSiO_3 , favored the strong root growth of beans in depth. Although not an accumulator plant Si, the Si content presented beans similar to rice, when there was H_4SiO_4 high availability in the soil. The metallic elements such as Al, Fe and Mn were strongly influenced by H_4SiO_4 in soil and plant, with decreasing levels and content in plant tissues, especially the accumulator species Si. This highlights the important role of CaSiO_3 in reducing possible toxic effects of these metals in plants, not only by the effect of pH, but also the association of these elements with the various forms of amorphous Si (silica) in soil and plant.

INTRODUÇÃO GERAL

A baixa fertilidade natural e elevada acidez dos solos tropicais estão entre os principais fatores que limitam o aumento da produtividade agrícola. Na região tropical da América do Sul, os solos ácidos ocupam 85 % da área total e no Brasil esse valor chega a 70 % (Cochrane, 1991; Quaggio, 2000).

Para superar essa baixa fertilidade natural do solo, possibilitar a manutenção e aumento da produtividade agrícola, há a necessidade da aplicação de corretivos de acidez do solo. O principal produto utilizado para esse fim é o calcário (composto por carbonatos de cálcio e magnésio), devido a sua abundância na natureza e baixo custo, além de possuir a capacidade de elevar o pH, reduzindo a toxidez de Al, e fornecer Ca e Mg para as plantas (Azevedo et al., 1996; Miranda & Miranda, 2000).

Outros produtos, constituídos por metassilicatos, podem substituir o calcário. Esses materiais, além de fornecer Ca, Mg e corrigir o pH do solo, adicionam quantidades expressivas de Si, que entra no solo na forma passível de ser absorvido pelas as plantas. A presença do ânion metassilicato (SiO_3^{2-}), análogo ao ânion carbonato (CO_3^{2-}) dos calcários, confere a esses materiais características de corretivo da acidez do solo. Dentre os produtos à base de metassilicatos, destacam-se as escórias de siderurgia, que são geradas em grandes quantidades como subprodutos da indústria siderúrgica.

Existem dois tipos básicos de escórias, atualmente chamados também de agregados siderúrgicos. Resumidamente, tem-se: 1- Escória de alto-forno: formada pela mistura entre a ganga do minério de ferro com as cinzas do coque ou carvão vegetal e do calcário, utilizado como fundente no processo de fabricação do ferro-gusa, composto principalmente por Ca, Si, Al e Mg, e teores menores de Fe, Ti e Mn (Rebelo et al., 2012); 2- Escórias de aciaria: é formada durante os processos de oxidação do aço. Este processo elimina carbono e íons de alumínio, fósforo e silício, que entram na composição da escória, juntamente com o fundente CaO. As tecnologias de produção de aço mais difundidas são escória LD (gerada no forno a oxigênio) e a produzida por fornos de arco elétrico (Filev, 2012).

Atualmente essas escórias são utilizadas como corretivos agrícolas, após moagem e tratamento para retirada de contaminantes, sendo encontradas com diferentes nomes comerciais.

Outra fonte de metassilicato é a Wollastonita (CaSiO_3), mineral piroxênio que ocorre em rochas metamórficas em ambientes naturais, formado também nas escórias de siderurgia. No Brasil, comprovou-se a existência de uma reserva de 5,5 milhões de toneladas de Wollastonita em Goianira (GO), de elevada qualidade (45% de CaO e 49 % de SiO_2) (Bittar e Silva, 2009)

O Si ocupa a segunda colocação entre os elementos mais abundantes da crosta terrestre, constituindo em torno de 27 % de sua massa. Mas, paradoxalmente, mesmo sendo tão abundante, muitos solos são pobres desse elemento na forma disponível ou absorvível pela planta, ou seja, na forma do ácido orto ou monossilícico (H_4SiO_4) (Lima Filho et al., 2009). Isso ocorre porque a forma predominante de silício no solo encontra-se dentro das estruturas de minerais como quartzo, micas, feldspatos, ilita, caulinita, dentre outros. Esses minerais possuem baixas constantes de equilíbrio de dissolução, onde muitas vezes a velocidade de lixiviação do H_4SiO_4 se sobrepõe à cinética de dissolução destes minerais (Mello & Perez, 2009).

O estudo da utilização do silício na agricultura tem aumentando nos últimos anos devido aos grandes benefícios que esse elemento pode propiciar às plantas e ao solo. Esses estudos envolvem diversas áreas do conhecimento como a fitopatologia, entomologia, fisiologia, bioquímica, fitotecnia e a ciência do solo. Dentro da ciência do solo, estudos com metassilicatos na área da química e fertilidade do solo têm demonstrado que sua aplicação em solos agrícolas pode diminuir a acidez do solo e os teores de alumínio trocável e metais pesados, aumentar a disponibilidade de fósforo, proporcionar maior efetividade na correção da acidez em camadas mais profundas e aumentar a CTC do solo (Datnoff et al., 2001).

Uma das grandes limitações do uso dos corretivos tradicionais no solo está relacionada à sua baixa mobilidade no perfil, ou seja, o efeito corretivo desses materiais fica restrito à camada de incorporação. Alguns estudos demonstram que corretivos constituídos por metassilicatos possibilitam maior mobilidade dos cátions e é mais efetivo na correção do solo em maiores profundidades, quando comparado à utilização somente de calcário. Tal fato seria de grande potencial para utilização em sistemas agrícolas onde há mínimo revolvimento do solo, como em culturas perenes e plantio direto. Entretanto, em outros trabalhos não foi demonstrado a maior eficiência em mobilidade de bases e correção do solo dos metassilicatos, chegando-se a sugerir que o metassilicato é menos móvel que o CaCO_3 .

O Si é tido como um elemento de interesse agronômico, uma vez que ele desempenha papéis importantes dentro na planta, aumentando a tolerância aos estresses bióticos (pragas e doenças) e abióticos (seca, salinidade e presença de elementos tóxicos) (Epstein, 2001). Quando presente na planta, o Si demonstra alta afinidade por cátions metálicos como o Al e Mn, reduzindo a toxidez desses elementos (Zanão Junior et al., 2010; Reis et al., 2013).

Estudos que enfoquem a utilização de materiais ricos em metassilicatos como corretivos na agricultura e como fonte de Si para as plantas são importantes para a compreensão da dinâmica das reações do metassilicato e do silício no solo. Assim, esses estudos contribuem para o entendimento dos benefícios advindos dessa aplicação e das possíveis restrições ao seu uso em determinadas situações.

O presente trabalho foi dividido em três capítulos. No Capítulo I foi avaliada a eficiência de neutralização da acidez do solo com CaSiO_3 (metassilicato de cálcio), comparando-se os valores de PN do CaSiO_3 e CaCO_3 aplicados a um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd). No Capítulo II avaliou-se a efetividade do CaSiO_3 na neutralização da acidez em profundidade e na mobilidade de elementos químicos no solo cultivado com plantas de arroz (acumuladora de Si) e feijão (não acumuladora). No Capítulo III avaliou-se a influência do CaSiO_3 , aplicado via solo, no crescimento da parte aérea e radicular e no acúmulo de Si, Al, N, Ca, Fe, Mn, Mg e K nas folhas das plantas de arroz e feijão cultivadas no LVAd.

LITERATURA CITADA

AZEVEDO, A. C.; KÄMPF, N. & BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. R. Bras. Ci. Solo, Campinas, SP, v. 20, 2: 191 – 198, 1996.

BITTAR, N. & SILVA, H.H. Wollastonita de Goianira-Goiás. In: E.S. MARTINSE S.H. THEODORO (eds.), Congresso Brasileiro de Rochagem, I, livro de resumos, Brasília, DF, 2009.

COCHRANE, T.T. Understanding and managing acid soils of tropical South America. In: DETURK, P.; PONNAMPERUMA, F.N. (Eds.). Rice production on acid soils of the tropics. Kandy: Institute of Fundamental Studies, 1991. p.113-122.

DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H. (Eds.) Studies in Plant Science: Silicon in agriculture, v. 8, 403 p., 2001.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs. concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). Silicon in agriculture. Amsterdam: Elsevier Science Publishing. 1-16, 2001.

Filev, R. Escória de Aciaria. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm> Acesso em 13/11/12

LIMA FILHO, O. F. de. História e uso do silicato de sódio na agricultura. Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 2009. 112p.

MELLO, J. W. V.; & PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). Química e mineralogia do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 1 p. 151-250.

MIRANDA, L. N.; & MIRANDA, J. C. C. de. Efeito residual do calcário na produção de milho e soja em solo Glei Pouco Húmico. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, MG, 24, 1: 209 – 215, 2000.

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

REBELO, M. M.; CUNHA; M. V. P. de O. & CORRÊA, J. A. M., Hidróxidos Duplos Lamelares à Base de Escória de Alto Forno. *Quim. Nova*, Vol. 35, nº 5, p. 883-888, 2012

REIS, W. J. P.; ALVES, E. E. N.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M. & REIS, F. P. Retenção de Al e Mn em tecidos vegetais de plantas de arroz e feijão cultivadas em presença ou não de silicato combinadas com doses de Zn. In: II Simpósio Mineiro de Ciência do Solo, 2013, Anais. Viçosa-MG, UFV, CD-ROM, 2013.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; FONTES, R. L. F.; NEVES, J. C. L.; KORNDÖRFER, G. H. & ÁVILA, V. T.; Rice grown in nutrient solution with doses of manganese and silicon. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1629-1639, 2010.

CAPÍTULO I

FATOR DE CORREÇÃO DO PODER NEUTRALIZANTE DO METASSILICATO DE CÁLCIO PARA RECOMENDAÇÃO COMO CORRETIVO DA ACIDEZ DO SOLO

RESUMO

Para a recomendação de corretivos de acidez do solo contendo metassilicato de cálcio (CaSiO_3), atualmente, utiliza-se o mesmo método realizado para o calcário. Através da determinação do poder neutralizante, sendo o CaCO_3 considerado o corretivo padrão com valor neutralizante igual a 100 %. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do CaSiO_3 na correção da acidez do solo tendo como referência o CaCO_3 . Foram ajustadas curvas de neutralização da acidez para um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) a partir da incubação de amostras de 200 g do LVAd com a adição de doses de CaSiO_3 e CaCO_3 P.A. A incubação ocorreu durante 15 dias, mantendo-se a mistura solo-corretivo com 73 % do equivalente de umidade do solo. Após a incubação foram ajustadas regressões polinomiais dos dados de pH, das misturas solo- CaSiO_3 e solo- CaCO_3 , em função das doses de cada corretivo aplicado. O CaSiO_3 corrigiu, no máximo, 75 % da acidez em comparação ao CaCO_3 (64,5 % em equivalente de CaCO_3), sendo que este valor diminuiu com o aumento do pH do solo (72 % em pH 6,00). A eficiência de 75 % do CaSiO_3 representa a eficiência teórica levando-se em consideração as reações químicas de polimerização do H_4SiO_4^0 que ocorrem quando o CaSiO_3 é adicionado ao solo. Essas reações formam polímeros com baixo pK_a , que liberam H^+ e promovem o tamponamento da acidez do solo, diminuindo a eficiência do CaSiO_3 . Intensa polimerização do H_4SiO_4^0 foi observada quando realizou-se a titulação com NaOH em mistura $\text{CaSiO}_3\text{-HCl}$. A polimerização do H_4SiO_4^0 que ocorre quando CaSiO_3 é adicionado ao solo é responsável pelo menor poder de neutralização do CaSiO_3 comparado ao CaCO_3 . Desta forma sugere-se usar o fator de correção de 75 % no cálculo da necessidade de calagem ao se utilizar fontes contendo metassilicatos para correção da acidez do solo.

SUMMARY: CORRECTION FACTOR OF THE NEUTRALIZING POWER OF CALCIUM METASILICATE FOR RECOMMENDATION AS TO CORRECTIVE SOIL ACIDITY

For recommending corrective soil acidity containing calcium metasilicate (CaSiO_3) currently uses the same method performed for limestone. By determining the neutralizing power, and the CaCO_3 considered the standard corrective with neutralizing value of 100 %. The objective of this study was to evaluate the efficiency of CaSiO_3 in neutralizing the soil acidity in comparison to CaCO_3 . Neutralization curves were carried out by adding different rates of liming material to an Oxisol. Soil samples were incubated for 15 days and soil moisture was kept around 73 % of the soil water holding capacity. After incubation, polynomial regressions of soil pH data were fitted as function of the rate of liming materials added. As result, CaSiO_3 corrected at most 75 % of the acidity in comparison to CaCO_3 (64.5 % relative neutralizing value), and this value tended to decline with the increase of soil pH (72 % in pH 6.00). This 75 % efficiency agrees with the theoretical calculation of CaSiO_3 taking into account the chemical reactions of polymerization of H_4SiO_4^0 that occur when CaSiO_3 is added to the soil. These reactions form polymers with low pK_a , which release H^+ and buffer soil pH, decreasing the efficiency of CaSiO_3 in neutralizing soil acidity. And this buffer capacity due to polymerization and release of H^+ is greater the higher the pH. Intense H_4SiO_4^0 polymerization was detected during titration of $\text{CaSiO}_3\text{-HCl}$ with NaOH . Polymerization of H_4SiO_4^0 that occurs when CaSiO_3 is added to the soil leads to a lower neutralization power of CaSiO_3 compared to CaCO_3 . Therefore it is suggested to use the 75 % correction factor in the calculation of lime requirement when using sources containing metasilicates, to corrective soil acidity.

INTRODUÇÃO

A faixa ideal de pH da solução do solo para a maioria das culturas situa-se entre 5,5 e 6,5. Fora desse intervalo, diversos processos químicos e biológicos no solo são alterados, causando variações na disponibilidade de nutrientes e elementos tóxicos, afetando o crescimento das plantas e ocasionando possíveis perdas na produtividade agrícola (Sousa et al., 2007).

O Brasil possui grandes áreas com solos de características distróficas nas quais a correção da acidez é imprescindível para o cultivo agrícola. O calcário é o principal corretivo de acidez do solo utilizado na agricultura devido à sua fácil obtenção em decorrência das grandes reservas naturais, sua eficiência como agente neutralizante e por ser fonte de cálcio e magnésio (CaCO_3 e MgCO_3). Como alternativa ao uso do calcário o uso de escórias de siderurgia tem aumentado, as quais são compostas principalmente por metassilicatos de cálcio (CaSiO_3).

CaSiO_3 e CaCO_3 reagem de forma similar no solo, elevando seu pH devido às reações de natureza básica descritas nas Equações de 1.1 à 1.8 (Lindsay, 1979; Ball & Nordstrom, 1991; Alcarde & Rodella, 2003)



A constante de equilíbrio de dissociação do CaCO_3 ($\log K^\circ_1$, Eq. 1.5) é menor que a do CaSiO_3 (Eq. 1.1), o que indica maior solubilidade do CaSiO_3 . As constantes de ionização dos ânions SiO_3^{2-} e CO_3^{2-} também diferem, indicando maior poder de consumo do H^+ (responsável pela elevação do pH do solo) pelo SiO_3^{2-} (Eq. 1.2, 1.3, 1.6 e 1.7).

Para a recomendação de corretivos de acidez do solo contendo CaSiO_3 , atualmente, utiliza-se o mesmo método realizado para o calcário. Determina-se o poder neutralizante (PN) desses produtos e calculam-se as doses em equivalente molar de CaCO_3 . Porém, existem trabalhos mostrando que essa recomendação leva à aplicação de doses insuficientes para atingir-se o pH ideal.

Prado et al. (2004) compararam a aplicação de calcário e de escória rica em metassilicatos, em quantidades equivalentes de CaCO_3 e mesma reatividade (granulometria), concluindo que o calcário foi mais efetivo na neutralização da acidez. Segundo esses autores, como não houve diferença entre as reatividades da escória e do calcário, tal diferença se deve à natureza química dos materiais, que confere aos mesmos valores diferentes de poder de neutralização. Deve ser ressaltado que Pereira et al. (2003) encontraram inconsistência nos valores obtidos na determinação do PN de escórias de siderurgia, identificando variação entre o valor de PN calculado (com base nos teores de CaO e MgO) e o determinado via reação química em laboratório. Eles observaram que o valor calculado era sempre maior do que o determinado em laboratório, sendo a magnitude da diferença dependente de cada material analisado. Essa observação indica a necessidade de mais estudos para a determinação do PN de escórias de siderurgia, como sugerido por Prado & Fernandes (2000) e Prado et al. (2004).

Em trabalho mais recente, Souza et al. (2008) compararam os efeitos de carbonatos (CaCO_3 e MgCO_3) e metassilicatos (CaSiO_3 e MgSiO_3) sobre características relacionadas à fertilidade do solo e também encontraram maior eficiência dos carbonatos na diminuição dos teores de Al^{3+} e $(\text{H} + \text{Al})$ e aumento nos valores de pH e CTC efetiva, em comparação aos metassilicatos. Segundos esses autores, a diferença é atribuída ao menor poder neutralizante dos silicatos (86 % em equivalente de CaCO_3). No entanto, deve-se observar que os cálculos das quantidades de carbonatos e silicatos adicionados ao solo foram feitos tendo como referência o CaO , ou seja, foram aplicadas quantidades estequiométricas (mol_c de Ca) de cada corretivo.

O objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência de neutralização da acidez do solo pelo CaSiO_3 e CaCO_3 em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, assim como sugerir um fator de correção para a recomendação de CaSiO_3 como corretivo de acidez do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Correção da acidez de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) com CaCO_3 e CaSiO_3

Foi utilizado um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) coletado na camada de 0-20 cm em Viçosa, Minas Gerais (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. Características químicas e físicas do LVAd

Características Químicas												
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	$\text{P}^{1/}$	$\text{K}^{1/}$	$\text{Ca}^{2+/2}$	$\text{Mg}^{2+/2}$	Al^{3+}	$\text{H+Al}^{3/}$	SB	t	T	V	m	$\text{MO}^{4/}$
	--mg L ⁻¹ --		-----cmol _c dm ⁻³ -----							-----%-----		g kg ⁻¹
4,20	8,6	13	0,18	0,04	1,85	10,50	0,25	2,10	10,75	2,30	88,10	41,40

Características Físicas						
Areia Grossa ^{5/}	Areia Fina ^{5/}	Silte ^{5/}	Argila ^{5/}	EU ^{6/}	CC ^{6/}	Classe
-----g kg ⁻¹ -----						
150	100	50	700	341	384	Muito Argilosa

¹Mehlich-1, ²KCl 1 mol L⁻¹, ³Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0 (Defelipo e Ribeiro, 1981); ⁴Matéria orgânica (Walkley-Black), ⁵Método da pipeta (EMBRAPA, 1997); ⁶Equivalente de Umidade; ⁶Capacidade de Campo = 0,081+ 0,888 EU (em kg kg⁻¹) (Ruiz et al., 2003). SB: Soma de Bases; t: CTC efetiva; T CTC à pH 7; V: Saturação de Bases; m: Saturação por Al;

Para o ajuste das curvas de neutralização da acidez do solo com CaSiO_3 e CaCO_3 , amostras de 200 g de solo secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm (TFSA) foram acondicionadas em sacos plásticos de 3 L, com doses crescentes de CaSiO_3 e CaCO_3 . As doses dos corretivos foram calculadas com objetivo de neutralizar determinados percentuais da acidez potencial (H+Al) do solo (Tabela 1.2). O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, no fatorial 2 × 7, sendo dois corretivos (CaCO_3 e CaSiO_3) aplicados em 7 doses (Tabela 1.2).

Tabela 1.2. Dose de corretivo adicionado, em cmol_c kg⁻¹, e quantidade de carbonato e metassilicato de cálcio, em g kg⁻¹, aplicados no solo para cada tratamento

% de (H+Al)	Dose de Corretivo (cmol _c kg ⁻¹)	Dose de CaCO_3 (g kg ⁻¹)	Dose de CaSiO_3 (g kg ⁻¹)
0	0,0	0,00	0,00
20	2,1	1,05	1,22
40	4,2	2,10	2,44
60	6,3	3,15	3,66
80	8,4	4,20	4,88
100	10,5	5,25	6,10
120	12,6	6,30	7,33

Após aplicação dos corretivos, os sacos plásticos foram fechados fazendo-se a agitação das misturas (solo+corretivo), vigorosamente, para homogeneizar o sistema e promover maior contato entre corretivo e solo. Em seguida os sacos foram abertos e adicionados 50 mL de água destilada, correspondente a 73,3 % do equivalente de umidade do solo. As misturas (solo+corretivo) permaneceram incubadas por 15 dias. Os sacos plásticos permaneceram abertos no primeiro dia para facilitar a saída do CO₂, e nos demais dias permaneceram parcialmente fechados para favorecer as trocas gasosas e limitar a evaporação da água.

Ao fim da incubação, as misturas (solo+corretivo) foram secas ao ar e passadas em peneira de malha de 2 mm (TFSA). Volumes de 10 cm³ de cada mistura foram colocados em copos plásticos de 50 mL, adicionados de 25 mL de água destilada, agitados com bastão de vidro por um minuto e deixados em repouso por 30 minutos. Após o repouso, as misturas foram novamente agitadas com bastão de vidro, procedendo-se a leitura de pH da suspensão utilizando-se pHmetro digital de bancada previamente calibrado.

Foi feita a análise de regressão polinomial (1 % de probabilidade) para os valores de pH do solo em função das doses dos corretivos aplicados. Foram plotados os intervalos com 95 % de confiança para cada uma das regressões.

Poder neutralizante do CaSiO₃

O poder de neutralização (PN) do metassilicato de cálcio foi determinado baseado no método descrito na Instrução Normativa Nº 51 do DAS/MAPA (Brasil, 2007). No entanto, as amostras não foram aquecidas para evitar que houvessem respingos dos reagentes para fora do frasco, como ocorreu em testes prévios. Em síntese: 0,5000 g de CaSiO₃ foram colocados para reagir com 50 mL de HCl 0,5 mol L⁻¹ (três replicatas). Agitou-se os recipientes em mesa horizontal durante 30 minutos, e em seguida foram deixadas em repouso por 24 h.

Realizou-se a titulação da mistura CaSiO₃-HCl após o repouso de 24 h, com NaOH 0,5 mol L⁻¹, utilizando-se fenolftaleína como indicador. Procedendo-se os cálculos do PN do CaSiO₃.

Titulação potenciométrica de misturas $\text{CaSiO}_3\text{-HCl}$ e $\text{CaCO}_3\text{-HCl}$ com NaOH

Com o objetivo de estudar a variação do pH das soluções contendo $\text{HCl}+\text{CaSiO}_3$ e $\text{HCl}+\text{CaCO}_3$ em função da adição de quantidades de NaOH, amostras de 0,4000 g de CaCO_3 e CaSiO_3 foram pesadas e colocadas para reagir com 10 mL de HCl 1 mol L^{-1} por 24 h, em frascos separados. Completadas as reações (após 24 h), foram realizadas titulações com NaOH $0,25 \text{ mol L}^{-1}$, com auxílio de micropipetadores manuais, sendo medida a alteração do pH a cada adição (volume variável de 20 a 1000 μL) da solução de NaOH $0,25 \text{ mol L}^{-1}$.

A partir dos dados da alteração do pH das soluções em função da quantidade de NaOH (mmol_c) adicionada foram geradas as curvas de titulação potenciométrica, relacionando os valores de pH em função das quantidades de NaOH adicionadas nas titulações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Correção da acidez do LVAd com CaCO_3 e CaSiO_3

A regressão polinomial de segunda ordem foi a que melhor se ajustou e explicou o fenômeno da mudança do pH em função das doses dos corretivos, tanto para o CaCO_3 quanto para o CaSiO_3 , sendo os coeficientes das regressões significativos a 1 % de probabilidade (Figura 1.1).

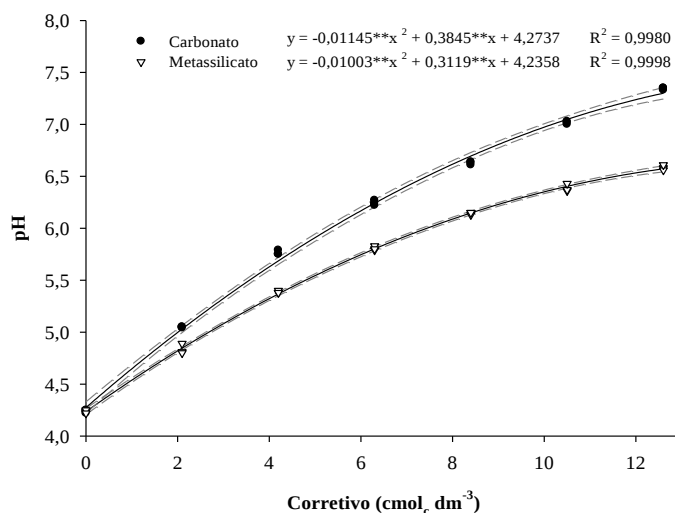


Figura 1.1. pH do solo em função das doses aplicadas de carbonato ou metassilicato de cálcio, em $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. As linhas tracejadas referem-se ao intervalo de 95 % de confiança para cada regressão.

Aplicando-se a mesma quantidade estequiométrica dos dois corretivos, isto é, a mesma quantidade em $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Tabela 1.2), o aumento do pH do solo foi maior com o CaCO_3 do que com o CaSiO_3 (Figura 1.1). Este resultado contraria o princípio de neutralização ácido-base onde 1 mol_c de qualquer corretivo deveria neutralizar 1 mol_c de acidez. Como os equilíbrios de dissociação de CaCO_3 e CaSiO_3 são semelhantes (Eq. 1.2, 1.3, 1.6 e 1.7), os dois corretivos deveriam neutralizar a mesma acidez no solo, elevando o pH de forma similar, e, portanto, as curvas da Figura 1.1 deveriam estar sobrepostas. O resultado indica que a reação de neutralização da acidez do solo pelo ânion SiO_3^{2-} parece não ocorrer seguindo a dinâmica de reações descritas nas Equações 1.2 e 1.3.

Cabe ressaltar que esse menor poder de neutralização do ânion SiO_3^{2-} não está relacionado à solubilidade dos sais, uma vez que a solubilidade em água do CaSiO_3 (95 mg L^{-1}) é 6,78 vezes maior que a do CaCO_3 (14 mg L^{-1}), de acordo com as constantes de

equilíbrio das equações 1.1 e 1.5 (Alcarde & Rodella, 2003; Alcarde, 2005). Com isso, a reação do CaSiO_3 é mais rápida que a do CaCO_3 .

A fim de avaliar a eficiência do CaSiO_3 em relação ao CaCO_3 , foram estimadas, a partir das regressões obtidas na Figura 1.1, as quantidades necessárias de cada corretivo (CaSiO_3 e CaCO_3) a serem aplicadas ao solo para atingir o mesmo valor de pH. Após a obtenção desses valores foi calculada a relação entre a quantidade de CaCO_3 dividida pela quantidade de CaSiO_3 (razão Carb./Silic.) necessária para atingir dado valor de pH. Essa razão Carb./Silic. foi denominada de eficiência da correção da acidez do CaSiO_3 em relação ao CaCO_3 . A faixa de pH avaliada foi entre 5,00 e 6,65, que foi o intervalo correspondente aos valores de pH medidos quando a menor dose de CaCO_3 e a maior dose de CaSiO_3 foram aplicadas, respectivamente. Esses valores de pH representam os extremos, menor e maior valores de pH, que encontram-se dentro das faixas que deram origem às equações ajustadas na Figura 1.1, sem que seja necessária nenhuma extrapolação. A partir desses dados foram plotados os valores de pH atingidos pelo solo com a razão Carb./Silic. que proporcionou determinado pH (Figura 1.2). A esses dados foi ajustada uma função racional.

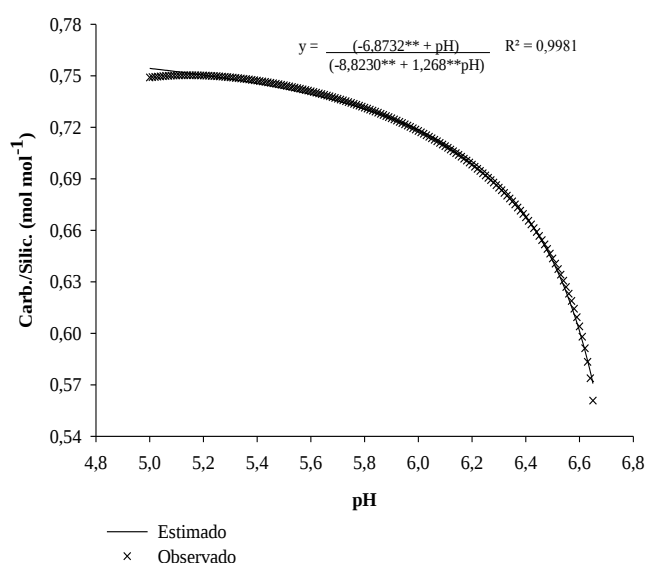


Figura 1.2. Relação entre a eficiência do metassilicato e do carbonato de cálcio (Carb./Silic. – mol mol^{-1}) em função do pH do solo. A partir desse gráfico percebe-se que o CaSiO_3 é menos efetivo que o CaCO_3 na correção da acidez do solo, sendo que essa eficiência é menor quanto maior o pH do solo.

A máxima relação molar entre CaCO_3 e CaSiO_3 (Carb./Silic.) foi de 75 % e foi observada no menor valor de pH estudado, 5,0 (Figura 1.2). Isto significa que a dose necessária para se atingir o mesmo valor de pH foi maior para o CaSiO_3 que para o CaCO_3 , mostrando uma eficiência máxima de 75 % em relação ao CaCO_3 . Observa-se que essa eficiência (Carb./Silic.) manteve-se próxima a 75 % até o pH 5,5, sendo que acima desse ocorreu a diminuição da eficiência, chegando a 60,4 % quando o pH aumentou para 6,6 (Figura 1.2).

Essa menor eficiência da correção da acidez pelo CaSiO_3 provavelmente está relacionada à polimerização do H_4SiO_4^0 (Equação 1.9 – Lindsay, 1979). A formação desses polímeros de Si a partir do H_4SiO_4^0 são acompanhadas da geração ativa de acidez (Eq. 1.9), levando à diminuição do poder de neutralização dos silicatos.



Como demonstrado nas Equações 1.1 à 1.4, o H_4SiO_4^0 é originado no final da reação de neutralização da acidez pelo CaSiO_3 . Enquanto na neutralização da acidez pelo CaCO_3 há formação de CO_2 (Eq. 1.8), que sai do sistema solo para a atmosfera por ser gasoso, o H_4SiO_4^0 (Eq. 1.4) permanece no solo. Esse acúmulo do produto da reação (H_4SiO_4^0) poderia prejudicar a continuidade da reação de neutralização, limitando-a. No entanto, o H_4SiO_4^0 originado da reação de neutralização da acidez do solo pelo CaSiO_3 (Eq. 1.4) se condensa (polimeriza) com outros três H_4SiO_4^0 , formando o polímero $\text{H}_6\text{Si}_4\text{O}_{12}^{2-}$ (Eq. 1.9), mas tal reação de polimerização acaba gerando acidez.

Partindo dos corretivos (CaSiO_3 e CaCO_3) até chegar nos produtos finais da reação ($\text{H}_6\text{Si}_4\text{O}_{12}^{2-}$ e CO_2) temos as reações descritas nas Equações 1.10 (soma das Equações 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 e 1.9) e 1.11 (soma das Equações 1.5, 1.6, 1.7 e 1.8, multiplicada por 4 para comparar a neutralização de 8H^+ por CaSiO_3 e CaCO_3).

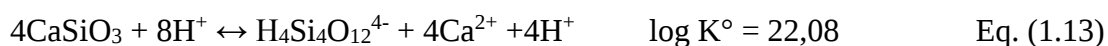


Ao comparar as equações 1.10 e 1.11 observa-se que a reação da acidez do solo com CaSiO_3 é mais favorável de ocorrer do que com CaCO_3 , devido à maior constante

de equilíbrio ($\log K^\circ$) para a reação do metassilicato. Porém, enquanto 4 mols de CaCO_3 neutralizam 8 H^+ (Eq. 1.11), a mesma quantidade (4 mols) de CaSiO_3 neutralizam efetivamente apenas 6 H^+ , devido à geração de acidez (2H^+) causada pela polimerização do H_4SiO_4^0 (Eq. 1.9 e 1.10). As reações de neutralização das equações 1.10 e 1.11 mostram que, enquanto o CaCO_3 tem eficiência de 100 % (referência) com um balanço de 8 mol_c de H^+ neutralizados por 8 mol_c de CaCO_3 , o CaSiO_3 apresenta eficiência de apenas 75 %, com um balanço de 6 mol_c de H^+ neutralizados por 8 mol_c de CaSiO_3 ($6 \div 8 = 0,75$).

O valor teórico de 75 % de eficiência da neutralização do CaSiO_3 em relação ao CaCO_3 (relação Carb./Silic.) coincide com o valor encontrado empiricamente, demonstrado na Figura 1.2. Mas, como citado anteriormente, esse valor de 75 % de eficiência do CaSiO_3 foi constante até pH próximo a 5,5. A partir desse pH a eficiência diminuiu.

O fato da eficiência do CaSiO_3 em corrigir a acidez do solo diminuir com o aumento do pH (Figura 1.2) parece estar estritamente relacionado com a formação do polímero ($\text{H}_6\text{Si}_4\text{O}_{12}^{2-}$) no solo. De acordo com a Equação 1.12 (Iler, 1979) verifica-se que, com a evolução do processo de polimerização, a geração de acidez pode ser ainda maior, gerando quatro mols de H^+ a partir da polimerização do H_4SiO_4^0 . Realizando o mesmo procedimento descrito para chegar a Equação 1.10, obteve-se à Equação 1.13 (soma das Equações 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 e 1.12). Na Equação 1.13 observa-se que 8 H^+ são neutralizados pelo CaSiO_3 , porém, 4 H^+ são liberados na formação do $\text{H}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}^{4-}$. Com esses valores, o balanço para a neutralização de H^+ com CaSiO_3 é igual a 4, o que em relação ao CaCO_3 corresponde a 50 % de eficiência na neutralização ($4 \div 8 = 0,50$).



Observa-se que as Equações 1.10 e 1.13 mostram os mesmos polímeros com quatro átomos de Si ($\text{H}_8\text{Si}_4\text{O}_{12}$), mas com graus de desprotonação (perda de H^+) diferentes ($\text{H}_6\text{Si}_4\text{O}_{12}^{2-}$ e $\text{H}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}^{4-}$), ou seja, o polímero formado a partir do H_4SiO_4^0 possui características de ácido, sendo um ácido polissilícico. E esse ácido polissilícico tem caráter mais ácido que o ácido monossilícico (H_4SiO_4).

Segundo Iler (1979), à medida que o H_4SiO_4^0 se polimeriza, o pK_a do polímero formado diminui para próximo do valor 6,7. O pK_a de grupos silanóis ($\equiv\text{Si-OH}$) na superfície da sílica-gel varia de 6 a 8 (Dugger et al., 1964). Sabe-se que para 19 % dos grupos silanóis na superfície de sílica fundida o pK_a é 4,5, enquanto que para 81 % o pK_a é 8,5 (Ong et al., 1992). De acordo com esses dados, nota-se que os polímeros formados a partir da condensação dos H_4SiO_4^0 , oriundos da reação de neutralização do CaSiO_3 , possuem menor pK_a que o H_4SiO_4^0 (pK_{a1} de 9,71) (Lindsay, 1979).

O fato do polímero possuir menores valores de pK_a parece justificar a diminuição da eficiência da correção da acidez do solo ao se utilizar produtos contendo metassilicatos. Isso justificaria, também, a diminuição da eficiência de neutralização da acidez pelo CaSiO_3 à medida que há o aumento do pH do solo, uma vez que em maiores valores de pH, haverá maiores desprotonações do polímero $\text{H}_8\text{Si}_4\text{O}_{12}$. Na prática isso significa dizer que o poder neutralizante (PN) do CaSiO_3 não é um valor fixo, como ocorre para o CaCO_3 , mas sim, é um valor dependente do pH do solo que se pretende chegar.

Para estimar o PN (ou relação Carb./Silic., em kg kg^{-1}) do CaSiO_3 utilizou-se o mesmo método para a geração da Figura 1.2, no entanto os dados da quantidade dos corretivos adicionados da Figura 1.1 foram convertidos de $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para g kg^{-1} . Com isso foi possível gerar a Figura 1.3.

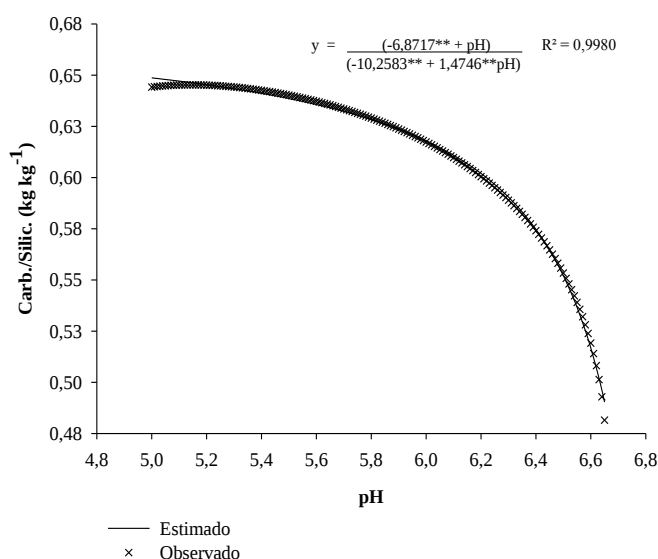


Figura 1.3. Eficiência do metassilicato de cálcio, em kg kg^{-1} (equivalente ao Poder Neutralizante do CaSiO_3), em relação ao carbonato de cálcio em função do pH do solo.

A partir da Figura 1.3 é possível estimar diretamente, a partir da função descrita, qual seria o PN do CaSiO_3 para determinado pH que se pretende chegar. O que diferencia os corretivo CaSiO_3 dos corretivos à base de carbonatos, pois o PN para os diversos tipos de corretivos são fixos, independente do pH que se pretende chegar no solo. No entanto, o CaSiO_3 (e provavelmente outros metassilicatos) possuem uma particularidade nas reações de neutralização da acidez do solo, que é justamente a formação de polímeros polipróticos (podendo liberar até 8 H^+ em pH alto) com características ácidas.

O PN máximo do CaSiO_3 obtido nesse trabalho foi de 64,50 % (Figura 1.3), correspondente ao produto do valor neutralizante adotado atualmente (86 %) pela máxima eficiência molar de 75 % ($86 \times 0,75 = 64,50 \%$).

Desta forma, ao se recomendar a utilização de produtos contendo metassilicatos, para correção da acidez do solo, sugere-se a seguinte metodologia para encontrar o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) a ser corrigido no cálculo da Necessidade de Calagem (NC): Calcular o Valor Neutralizante (VN) do corretivo, com base nos teores de CaO e MgO , então multiplicar o valor encontrado por 75 % (eficiência máxima do metassilicato em relação ao carbonato – Figura 1.2) e multiplicar pela reatividade do material (baseado na análise granulométrica). Por exemplo: se um corretivo a base de metassilicato possui reatividade de 100 % (100 % do material passa pela peneira nº 50 ABNT), teor de 30 % de CaO e 9 % de MgO , o seu VN será de 75,82 % ($30 \% \times 1,783 + 9 \% \times 2,481 = 75,82\%$), multiplicando por 75 % de eficiência esse valor será corrigido para 56,86 %, e por ser material fino, com 100 % de reatividade (multiplicar por 1), o PRNT deste material deverá ser de 56,86 %.

A Equação 1.14 sintetiza o parágrafo anterior, para que se estime o PRNT dos corretivos a base de metassilicatos.

$$\text{PRNT}_{\text{est}} (\%) = \text{RE} \times (\text{CaO} \times 1,783 + \text{MgO} \times 2,481) \times 0,75 \div 100 \quad (\text{Eq. 1.14})$$

Onde

PRNT_{est} : é o Poder Relativo de Neutralização Total estimado para o uso de corretivos à base de metassilicatos, em %;

RE: é a reatividade do material, de acordo com a granulometria, em %;

CaO: teor de óxido de Ca na amostra, em %;

1,783: constante para converter CaO em equivalente de CaCO_3

MgO: teor de óxido de Mg na amostra, em %;

2,481: constante para converter MgO em equivalente de CaCO_3 ;

0,75: máxima eficiência do CaSiO_3 em relação ao CaCO_3 ;

100: constante para que o resultado do $\text{PRNT}_{\text{est.}}$ seja em %

Chaves & Faria (2008) avaliaram um produto a base de escória que possuiu 36 % de CaO, 9 % de MgO e PRNT de 64,6 %. Utilizando o método proposto acima o VN desse produto é de 86,52 %, se multiplicar pela eficiência de 75 % e reatividade 100 %, o PRNT estimado é de 64,89 %, bem próximo do valor (64,6 %) descrito pelos autores.

Diante dos dados expostos neste trabalho, é importante ressaltar o fato que os polímeros formados no solos tem a capacidade de se despolimerizar à medida que há a acidificação do meio ou um dreno de H_4SiO_4 (lixiviação ou absorção pela planta). Em ambos os casos haverá consumo de H^+ da solução do solo (reação no sentido inverso da Eq. 1.9). Consequentemente, esse fato acarretará em um efeito residual maior da correção da acidez pelo CaSiO_3 que pelo CaCO_3 , ou seja o solo será mais tamponado a medida que mais polímeros são formados, tendendo a se re-acidificar com maior dificuldade.

Mesmo o CaSiO_3 apresentando menor eficiência que o CaCO_3 em corrigir o pH do solo, o uso de fontes contendo metassilicatos proporciona outras vantagens, como o fornecimento de Si para as plantas na forma de H_4SiO_4 , contribuindo para maior tolerância ao diversos estresses bióticos e abióticos (Epstein, 2001); além de não emitir CO_2 como os carbonatos, mitigando a emissão de gases do efeito estufa.

Poder neutralizante do CaSiO_3

O poder neutralizante (PN) encontrado para o CaSiO_3 foi 74,58 % (erro-padrão = $\pm 1,26$; n= 3). Embora o valor de PN tenham sido menor que 86 % (VN do CaSiO_3), o valor encontrado de 74,58 % foi maior que 64,50 % que foi estimado por meio das relações entre quantidades de CaCO_3 e CaSiO_3 em diferentes valores de pH (Figura 1.3).

Possivelmente, o método de determinação do PN utilizado nesse trabalho não é sensível o suficiente para detectar toda a acidez gerada devido à polimerização do H_4SiO_4^0 como ocorreria no solo, sendo sensível em detectar apenas a primeira desprotonação do polímero. Isso é plausível, considerando que com apenas uma desprotonação a eficiência

molar seria de 87,5 % uma vez que o balanço de H^+ no equilíbrio estaria de acordo com a relação $7 \div 8 = 0,875$. Sendo assim, o PN teórico encontrado com a utilização desse método seria 75,25 % ($86 \% \times 0,875$), que é próximo do valor encontrado empiricamente no laboratório ($74,58 \% \pm 1,26$).

Titulação potenciométrica de misturas $CaSiO_3$ -HCl e $CaCO_3$ -HCl, com NaOH

O PN do $CaCO_3$ foi maior que do $CaSiO_3$, quando se compara a neutralização do HCl colocado em excesso para reagir com os corretivos, uma vez que foi requerido menos NaOH para neutralizar o H^+ que sobrou da reação entre $CaCO_3$ e HCl comparado ao que sobrou da reação entre $CaSiO_3$ e HCl (Figura 1.4).

Observa-se que com a adição de NaOH para a reação com $CaCO_3$ o pH sobe de próximo de 3,0 para 10,5 abruptamente, enquanto que para o $CaSiO_3$ o aumento de pH é abrupto de 3,0 até 7,0, observando-se incrementos cada vez menores a partir daí. A razão disso é o efeito tampão devido ao aumento da forma desprotonada do $H_4SiO_4^0$ (formado na reação do HCl com o $CaSiO_3$) e à sua intensa polimerização e consequente desprotonação do polímero. Essa polimerização fica evidente quando se faz a titulação da mistura $CaSiO_3 + HCl$ com NaOH (Figura 1.5-D).

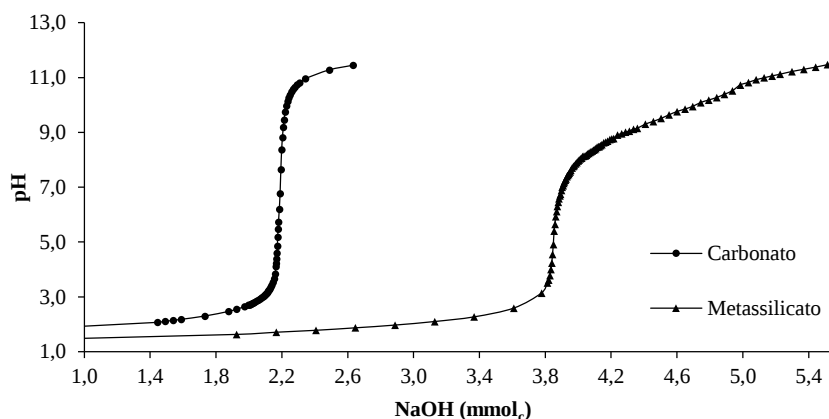


Figura 1.4. Valores de pH em função da quantidade de NaOH (mmol) adicionados nas titulações de 0,4000 g de $CaCO_3$ e $CaSiO_3$ com 10 mL HCl 1 mol L^{-1} .

A desprotonação do $H_4SiO_4^0$ facilita a polimerização e o polímero formado apresenta, como citado anteriormente, pK_a menor que o pK_a do $H_4SiO_4^0$. Esse efeito corresponde a um tamponamento do meio onde o incremento no pH fica menor a cada

unidade de NaOH adicionada. Observa-se que no ponto de equivalência (quando a curva muda de concavidade), o pH é 7,0 para a reação do CaCO_3 e 5,2 para o CaSiO_3 .

Os resultados da titulação potenciométrica para o CaSiO_3 corroboram com o fato de que o polímero formado apresenta característica ácida e afeta a reação ácido-base entre corretivo (que nesse caso foi o NaOH) e acidez (excesso de HCl), funcionando como um tampão. O mesmo pode ocorrer no solo à medida que formas poliméricas de Si são formadas, comportando-se como tampão da reação entre o CaSiO_3 e a acidez do solo.

Polimerização do H_4SiO_4

No solo a formação do polímero de Si a partir do CaSiO_3 ocorre devido à sua reação com a acidez, que produz o H_4SiO_4^0 . Este, ao entrar em contato com a matriz do solo (rica em diferentes formas de silício, como minerais primários e secundários) e devido à elevação do pH, polimeriza-se.

A Figura 1.5 refere-se ao comportamento do CaSiO_3 em meio ácido e básico. Observa-se na Figura 1.5-A que ao se adicionar o CaSiO_3 em HCl 1 mol L^{-1} houve a formação do H_4SiO_4^0 (Eq. 1.1 a 1.4), mas o H_4SiO_4^0 não se polimerizou, provavelmente devido ao alto valor do pK_{a1} do H_4SiO_4^0 , que é de 9,71 (Lindsay, 1979). Dessa maneira, o ácido orto ou monossilícico (H_4SiO_4) começa a desprotonar de forma expressiva em pH alcalino. Segundo Mello & Perez (2009), somente em valores de pH maiores que 8,5 é que as espécies iônicas (H_3SiO_4^-) contribuem expressivamente para a sílica total em solução. Na faixa normal de variação de pH dos solos o H_4SiO_4^0 é a principal espécie em solução. Em valores de pH próximos ao valor do pK_{a1} do H_4SiO_4 torna-se mais fácil a polimerização do Si, uma vez que para haver a polimerização deve haver aproximação entre os H_4SiO_4^0 e esses se ligarem, e com a perda de um H^+ , tais fenômenos ocorrem com maior probabilidade.



Figura 1.5. 0,4000 g de CaSiO_3 em: (A) 25 mL de HCl 1 mol L^{-1} ; (B) 25 mL de NaOH 1 mol L^{-1} ; (C) 25 mL de HCl 1 mol L^{-1} + titulação com NaOH 1 mol L^{-1} 15 minutos após adição do HCl ; (D) 25 mL de HCl 1 mol L^{-1} + titulação com NaOH 1 mol L^{-1} 16 horas após adição do HCl .

A adição de CaSiO_3 diretamente à solução de NaOH não resulta em formação do polímero (Figura 1.5-B) uma vez que em solução concentrada de uma base forte a quantidade de H_4SiO_4^0 que se forma, originada da reação com o CaSiO_3 , é extremamente pequena. Isso é ilustrado na Figura 1.6, que mostra a relação entre pH da solução e logaritmo da atividade do H_4SiO_4^0 , cujo ajuste foi elaborado a partir da soma das Equações 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4 ($\text{CaSiO}_3 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4^0 + \text{Ca}^{2+}$), considerando-se as atividades de Ca^{2+} iguais a 1 mol L^{-1} [$\text{Log}(\text{Ca}) = 0$] e $0,0032 \text{ mol L}^{-1}$ [$\text{Log}(\text{Ca}) = -2,5$]. Lindsay (1979) faz referência ao valor -2,5 como o Ca trocável do solo ou Ca-solo.

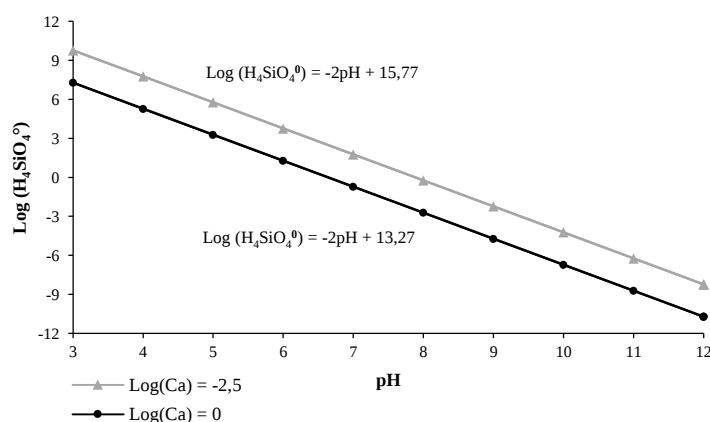


Figura 1.6. Logaritmo da atividade do H_4SiO_4^0 em equilíbrio com CaSiO_3 em função do pH da solução quando a atividade do Ca^{2+} é 1 mol L^{-1} [$\text{Log}(\text{Ca}) = 0$] e $0,0032 \text{ mol L}^{-1}$ [$\text{Log}(\text{Ca}) = -2,5$].

A atividade do H_4SiO_4^0 originado da reação do CaSiO_3 com o H^+ da solução cai linearmente e 100 vezes a cada aumento de uma unidade do pH da solução (Figura 1.6). Adicionalmente, quando o logaritmo da atividade de Ca da solução é aumentada de -2,5 para zero 0, a atividade do H_4SiO_4^0 diminui. Pode-se observar que em pH 3 o logaritmo da atividade do H_4SiO_4^0 é 9,77 [para $\text{Log}(\text{Ca}) = -2,5$] e diminui para 7,27 [para $\text{Log}(\text{Ca}) = 0$].

Quando se adicionou o CaSiO_3 ao HCl e em seguida procedeu-se com a titulação com NaOH (Figura 1.5-C), houve polimerização mas com menor intensidade que a observada quando a titulação ocorreu 16 h após o contato entre o CaSiO_3 e o HCl (Figura 1.5-D), devido ao pouco tempo de contato (15 minutos) entre o CaSiO_3 e o HCl no frasco da Figura 1.5-C. Na Figura 1.5-D, observa-se intensa polimerização devido ao maior tempo de contato (16 horas) entre o CaSiO_3 e HCl, conseqüentemente formando maiores quantidades de H_4SiO_4^0 em solução e ao adicionar NaOH, ocorreu a polimerização como descrito na Equação 1.9. A viragem da cor da fenolftaleína ocorreu com 23 mmol de OH^- quando se titulou após 15 minutos e 19,3 mmol de OH^- quando se titulou após 16 h, mostrando a diferença entre o consumo de H^+ pelo CaSiO_3 devido ao tempo de reação, o que coincide com a maior intensidade de polimerização do H_4SiO_4^0 .

CONCLUSÕES

1. A eficiência da correção da acidez do solo pelo CaSiO_3 foi de no máximo 75 %, em relação ao CaCO_3 , considerando a faixa de pH entre 5,00 e 6,65, sugerindo o uso do valor de 75 % para correção no cálculo do PRNT para melhor recomendação da Necessidade de Calagem;
2. Com o aumento do pH do solo, o CaSiO_3 torna-se menos eficiente em corrigir a acidez do solo que o CaCO_3 devido ao efeito da polimerização do H_4SiO_4 , que gera polímeros com caráter ácido;
3. A acidez gerada pelas reações de polimerização do H_4SiO_4 faz com que o CaSiO_3 não apresente um valor fixo de PN, como o CaCO_3 , sendo que o PN do CaSiO_3 diminui com o aumento do pH;
4. A formação de polímeros de Si a partir do CaSiO_3 somente ocorre após sua reação com acidez da solução, seguida da introdução de OH^- no meio;

LITERATURA CITADA

ALCARDE, J. C. Corretivo de acidez dos solos: características e interpretações técnicas. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 2005. 24 p. (Boletim Téc. 6).

ALCARDE, J.A. & RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A. S. & ALVARES V., V.H., eds. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p.291-334.

BALL, J. W. & NORDSTROM, D. K. WATEQ4F - User's manual with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-129, California, 1991 185 p.

BRASIL (2007), Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos- Instrução Normativa SDA Nº 28, De 27 De Julho De 2007. Disponível em: <<http://migre.me/fKdfY>>. Acesso em 14/08/2013

CHAVES, L. H. G; & FARIAS, C. H. A. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo e na disponibilidade de cálcio, magnésio e fósforo. Caatinga 21, 5:75-82, 2008.

DEFILIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Viçosa, UFV, 1981. 17p. (Boletim de Extensão, 29)

DUGGER D. L., STANTON J. H., IRBY B. N., MCCONNELL B. L., CUMMINGS W. W., and MAATMAN R. W. The exchange of twenty metal ions with the weakly acidic silanol group of silica gel. J. Phys. Chem. 68:757-760, 1964.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs. concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). Silicon in agriculture. Amsterdam: Elsevier Science Publishing. 1-16, 2001.

ILER, R. K. The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry. Wiley-Interscience, New York, 1979. 864p.

LINDSAY, W.L. Chemical equilibria in soils. New York: John Wiley & Sons, 1979. 449p.

MELLO, J. W. V.; & PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). Química e mineralogia do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 1 p. 151-250.

ONG, S.W.; ZHAO, X.L.; EISENTHAL, K.B. Polarization of water molecules at a charged interface: second harmonic studies of the silica/water interface Chem. Phys. Lett., 191: 327-335, 1992.

PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H.; MOURA, W. F.; CORRÊA, G. F. Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. R. Bras. Ci. Solo, 27:265- 274, 2003.

PRADO R. M.; NATALE, W.; FERNANDES, F. M.; CORRÊA, M. C. M. Reatividade de uma escória de siderurgia em um Latossolo vermelho distrófico. R. Bras. Ci. Solo, 28:197-205, 2004.

PRADO, R.M. & FERNANDES, F.M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. Sci. Agric., 57:739-744, 2000.

RUIZ, H.A.; FERREIRA, G.B. & PEREIRA, J.B. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. R. Bras. Ci. Solo, 27:389-393, 2003.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N. & OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.205-274.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; CARVALHO, R.; TORRES, P. R. F. & POZZA, A. A. A. Atributos químicos de solos influenciados pela substituição do carbonato por silicato de cálcio. R. Bras. Ci. Solo, 32:1563-1572, 2008.

CAPÍTULO II

INFLUÊNCIA DO METASSILICATO DE CÁLCIO NA CORREÇÃO DA ACIDEZ E NA MOBILIDADE DE ELEMENTOS EM UM LATOSSOLO CULTIVADO COM ARROZ E FEIJÃO

INTRODUÇÃO

Devido às condições de baixa fertilidade e alta acidez encontradas em grande parte dos solos brasileiros, a aplicação de corretivos de acidez do solo torna-se prática essencial para o aumento e manutenção das produtividades agrícolas. O principal produto utilizado para esse fim é o calcário, abundante na natureza, de baixo custo e eleva o pH (reduzindo a toxidez de Al) e a saturação por bases do solo, além de fornecer Ca e Mg (Azevedo et al., 1996; Miranda & Miranda, 2000).

No entanto, o calcário é pouco solúvel e os produtos de sua reação têm mobilidade limitada no perfil do solo. A ação da calagem, realizada superficialmente em áreas sem incorporação, normalmente fica restrita às camadas superficiais do solo, não ultrapassando os primeiros 10 cm de profundidade (Ritchey et al., 1982; Sá, 1993; Caires et al., 1998; e Amaral et al., 2004). Tal fato torna-se limitante o uso de calcários em cultivos onde há o mínimo revolvimento do solo, como no plantio direto e em áreas com culturas perenes já estabelecidas.

Como alternativa ao calcário, existe no mercado produtos ricos em metassilicato de cálcio e magnésio (CaSiO_3 e MgSiO_3) que, semelhante aos carbonatos presentes nos calcários, são sais de reação básica. Esses produtos são, em sua maioria, subprodutos das siderúrgicas, denominados escórias ou agregados siderúrgicos.

Um aspecto interessante dos corretivos de acidez do solo contendo metassilicatos é que estes cumprem a mesma função do calcário sem resultar na emissão de CO_2 para o ambiente. E adicionam H_4SiO_4 ao solo, o que aumenta a quantidade de Si passível de ser absorvido pelas plantas.

O CaCO_3 possui solubilidade em água igual a 14 mg L^{-1} e o CaSiO_3 de 95 mg L^{-1} , ou seja, o metassilicato de cálcio é 6,78 vezes mais solúvel que o carbonato de cálcio (Alcarde, 1992; Alcarde & Rodella, 2003). De acordo com Alcarde (1992), Alcarde &

Rodella (2003), Ramos et al. (2006) e Oliveira (2012), analisando somente pela maior solubilidade em água, esperar-se-ia que o CaSiO_3 propiciasse maior mobilidade, em profundidade, de bases no solo e maior eficiência na correção da acidez que o carbonato de cálcio.

No entanto, o sistema solo é complexo e assim que o carbonato e metassilicato de cálcio vão para a solução do solo, grande parte dos ânions CO_3^{2-} ou SiO_3^{2-} irão participar da reação de neutralização de diferentes fontes da acidez. Assim, o cátion Ca^{2+} não estará associado ao seu ânion acompanhante, diminuindo sua mobilidade no perfil, por ser atraído e retido na CTC do solo. Outro ponto seria a maior afinidade do ânion SiO_3^{2-} pela fase sólida (argilas e óxidos de ferro e alumínio), sendo até mesmo capaz de bloquear sítios de adsorção de fosfatos (Holt & King, 1955; Iler, 1979; Leite, 1997; Carvalho et al. 2000; Carvalho et al. 2001, Cessa et al., 2011), o que não ocorre com o íon CO_3^{2-} . Assim, a mobilidade de bases ao se aplicar fontes contendo metassilicato seria mais limitada, sendo influenciada pela quantidade e qualidade das argilas presentes no solo.

Souza et al. (2008), avaliando o efeito da substituição em equivalentes molares do CaCO_3 pelo CaSiO_3 , em quatro classes distintas de solos, verificaram que houve aumento do Si, acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) e saturação por Al e redução nos valores de pH, soma de bases, CTC efetiva e saturação por bases, considerando o CaSiO_3 menos eficaz que o CaCO_3 .

Prado & Fernandes (2000) objetivando avaliar a recomendação de correção da acidez para escórias de siderurgia, baseada no poder de neutralização adotado para o calcário, em Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico, concluíram que a reatividade da escória depende da classe de solo, sendo inferior ao calcário. E verificaram que não apresentou comportamento satisfatório para estimar a necessidade de produto para a correção da acidez do solo, sugerindo a necessidade de mais estudos.

Ainda não há dados suficientes na literatura para afirmar que corretivos de acidez constituídos por metassilicatos promovem maior movimentação de bases e possuem maior efetividade na correção da acidez do solo em camadas mais profundas que os corretivos constituídos por carbonatos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a efetividade do CaSiO_3 na neutralização da acidez em profundidade e na mobilidade de elementos químicos no solo cultivado com

plantas de arroz (*Oryza sativa* L.; acumuladora de Si) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.; não acumuladora de Si).

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, MG, sendo cultivadas plantas de arroz e de feijão em recipientes confeccionados com tubos de PVC de 150 mm de diâmetro e 45 cm de altura, preenchidos com solo.

O solo foi coletado no Campus da Universidade Federal de Viçosa, município de Viçosa – MG, na camada delimitada pela profundidade de 0-20 cm, sendo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). Foram retiradas amostras compostas que foram secas, destorroadas e passadas por peneira de 2 mm, para a realização das análises químicas e físicas, conforme metodologia descrita por Silva (2009) (Tabela 1.1, Capítulo I).

A cultivar de feijão utilizada foi a Pérola que possui hábito de crescimento indeterminado com ciclo médio de 95 dias, porte semiereto (tipo II-III), sementes maiores de coloração bege clara com listras marrons-claras, resistência à ferrugem e ao mosaico dourado.

A cultivar de arroz utilizada foi a Metica-1 que apresenta características o porte médio (100-120 cm), ciclo médio de 100 dias da emergência ao florescimento, grãos tipo longo fino (agulhinha), suscetível a brusone (*Pyricularia oryzae* Cav.) e acamamento.

Os tubos para crescimento das plantas foram compostos por oito segmentos (anéis de PVC), sendo sete segmentos com altura de 5 cm cada e um segmento com altura de 10 cm, unidos por fita adesiva Silvertape, formando um tubo de 45 cm de altura total e com diâmetro de 15 cm. No topo do vaso foi colocado o anel referente ao segmento com 10 cm, deixando-se 5 cm de espaço livre próximo à borda superior, para fazer a irrigação e evitar perdas de solo, sendo os outros 5 cm e preenchidos com solo (camada de 0-5 cm), ou seja, o tubo possuiu altura útil, com solo, de 40 cm.

Os outros sete anéis foram colocados na extremidade inferior do segmento de 10 cm, sendo o volume de cada segmento completamente preenchido com solo constituindo

as camadas de 5-10; 10-15; 15-20; 20-25; 25-30; 30-35; e 35-40 cm. Na base do tubo, cobrindo todo o seu diâmetro, colocou-se tela fina de nylon, de modo a evitar a perda de solo permitindo a passagem da solução de percolação através do solo para o exterior do tubo.

O experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados, no esquema de parcelas subdivididas, com a combinação de três corretivos (CaSiO_3 , CaCO_3 e CaSO_4) e duas cultivares (arroz e feijão) constituindo as parcelas (Tabela 2.1), e as oito profundidades do solo constituindo as subparcelas. Foram realizadas três repetições para cada parcela. Os segmentos do tubos foram unidos por fitas de diferentes cores para cada diferente parcela, dentro de cada cultura (arroz e feijão; Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Parcelas avaliadas em casa de vegetação.

Parcela	Metassilicato	Sulfato	Carbonato	Espécie	Cor do tubo
F-T	0	0	0	Feijão	Cinza
F-Si	D _{Si}	0	0	Feijão	Azul
F-Si+G	D _{Si}	D _G	0	Feijão	Vermelho
F-C	0	0	D _C	Feijão	Verde
F-C+G	0	D _G	D _C	Feijão	Branco
F-G	0	D _G	0	Feijão	Amarelo
A-T	0	0	0	Arroz	Cinza
A-Si	D _{Si}	0	0	Arroz	Azul
A-Si+G	D _{Si}	D _G	0	Arroz	Vermelho
A-C	0	0	D _C	Arroz	Verde
A-C+G	0	D _G	D _C	Arroz	Branco
A-G	0	D _G	0	Arroz	Amarelo

F: Feijão; A: Arroz; T: testemunha; Si: aplicação da dose de CaSiO_3 ; C: aplicação da dose de CaCO_3 ; G: aplicação da dose de CaSO_4 ;

As doses de sulfato de cálcio, ou gesso, (D_G) foram calculadas utilizando-se a Equação 2.1, descrita por Alvarez V. et al.(1999), tendo-se como referência a textura do solo da camada subsuperficial, onde X representa o teor de argila (%) e a Necessidade de Gesso (NG) é dada em t ha⁻¹ para uma camada de 20 cm de profundidade e aplicação em área total, ou seja, para o volume de 2000 m³ de solo. Sendo aplicados 1,33 t ha⁻¹ de CaSO_4 nas parcelas que continham gesso.

$$NG = 0,00034 - 0,002445 X^{0,5} + 0,0338886 X - 0,00176366 X^{1,5}$$

$$R^2 = 0,99995 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Para a definição das doses de carbonato (D_C) e metassilicato de cálcio (D_{Si}), primeiramente, foram determinadas as curvas de neutralização para o solo em estudo, a partir da incubação de amostras de solo com doses crescentes de CaSiO_3 e CaCO_3 . Obtidas as equações de regressão ajustadas do pH em função da dose de corretivo (Figura

1.1, Capítulo I), foram estimadas as doses de cada corretivo, tendo-se como referência elevar o pH do solo para 5,5.

Com as doses de cada corretivo de solo previamente estabelecidas, foi executada a primeira etapa da montagem do experimento. Primeiramente os tubos foram preenchidos com o solo seco, peneirado e não corrigido referente à profundidade de 15 a 40 cm ($4,42 \text{ dm}^3$ de solo), em seguida esse volume de solo foi umedecido até ser saturado, deixando o excesso de água ser drenado.

Os corretivos (CaSiO_3 , CaCO_3 e CaSO_4) foram aplicados apenas no volume de solo referente à camada de 0 a 15 cm ($2,65 \text{ dm}^3$ de solo). Conforme definido na Tabela 2.1, o metassilicato foi adicionado às parcelas Si e Si+G, o carbonato às parcelas C e C+G e o sulfato de cálcio às parcelas Si+G, C+G e G. Os corretivos foram misturados ao solo, referente a camada de 0-15 cm, e então foram acondicionados acima do solo já contido nos tubos (sobre a camada de 15-40 cm), referentes a cada parcela e repetição. Feito isso, foram adicionados 700 mL de água tratada (79 % do equivalente de umidade), para esses $2,65 \text{ dm}^3$ de solo.

Como as doses utilizadas de CaSiO_3 ($5,57 \text{ t ha}^{-1}$) foram maiores que a de CaCO_3 ($3,57 \text{ t ha}^{-1}$), foi utilizado o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ juntamente com o CaCO_3 para balancear a quantidade de cálcio nas parcelas C e C+G, que receberam CaCO_3 . Foi escolhido o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ pelo fato do ânion diidrogenofosfato possibilitar baixa mobilidade do Ca^{2+} no solo, contrário ao CaCl_2 , que devido ao cloreto possibilitar maior mobilidade de cátions no solo, o que poderia mascarar o resultado da mobilidade de cátions.

O semeio das espécies ocorreu no dia 10/08/2013, sendo colocadas cinco sementes por vaso, a 1 cm de profundidade. Após o semeio foram aplicados 100 mL da solução nutritiva, adicionando-se ao solo 100 mg dm^{-3} de N; 300 mg dm^{-3} de P; 150 mg dm^{-3} de K; 40 mg dm^{-3} de S; $0,81 \text{ mg dm}^{-3}$ de B; $1,33 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu; $1,55 \text{ mg dm}^{-3}$ de Fe; $3,66 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mn; $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$ de Mo; e 4 mg dm^{-3} de Zn (Novais et al., 1991). Foram aplicados também 50 mL da solução de 61 g L^{-1} de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, para manter a proporção de Ca:Mg igual 4:1. Após a aplicação da solução nutritiva, adicionou-se 1 L de água, para promover a percolação da água e lixiviação dos nutrientes para as camadas mais profundas do solo.

A emergência das plântulas foi observada no dia 16/08/2013, após o estabelecimento das mesmas foi realizado o desbaste, deixando-se duas plantas por vaso. Aos 23 dias após a emergência das plantas, foi realizada a adubação de cobertura com 150 mg de N, na forma de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, e 210 mg de K, na forma de K_2SO_4 .

Desde o semeio até um dia antes da colheita, foram aplicadas lâminas de 45,3 mm de água em cada vaso (800 mL de água), com turno de rega de três dias, simulando chuvas torrenciais.

Como o solo foi inicialmente saturado com água, cada aplicação de 45,3 mm objetivou forçar a lixiviação dos nutrientes, pelo excedente de água aplicada. O intervalo de três dias e a lâmina de 45,3 mm, foram definidos em testes prévios, para que houvesse a saída de água através do vaso, sem a criação de um ambiente de hipoxia e nem que as plantas sofressem por estresse hídrico. Pois o solo apresentou boa drenagem e dificilmente a evapotranspiração chegaria a 15 mm dia⁻¹ (45 mm em três dias). Ao final do experimento foram aplicados 623 mm de água.

O experimento foi desmontado após 38 dias da emergência das plantas. Primeiramente as plantas foram retiradas do vaso e depois os tubos foram desmontados, separando-se os anéis com 5 cm de altura cada, e retirando-se as amostras de solo nas diferentes profundidades de 0 a 40 cm. A amostra do solo foi retirada da região central do “cilindro de solo” com auxílio de um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro, sendo separadas as raízes do solo. O restante do solo foi descartado.

Após a retirada e preparo das amostras de solos dos diferentes vasos e profundidades (total de 288 amostras) foram realizadas as análises químicas. Foram determinados o pH em água na relação solo:solução 1:2,5; os teores de K disponível (extração com Mehlich-1); os teores de Ca e Mg trocáveis (extração com KCl 1 mol L⁻¹); e a acidez trocável por titulação (extração com KCl 1 mol L⁻¹) (Silva, 2009).

Para a extração do Si disponível no solo utilizou-se a solução extratora de ácido acético 0,5 mol L⁻¹ (Pereira et al., 2007). A dosagem do K foi realizada por espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e a dosagem dos elementos Si, Ca e Mg foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica (EAA).

Análise Estatística

Todos os dados da análise de solo foram submetidos à análise de variância. Os efeitos dos corretivos de acidez (metassilicato e carbonato de cálcio) e gesso para cada espécie de planta (arroz e feijão) foram avaliados por meio de contrastes médios (Tabela 2.2). Os coeficientes dos contrastes analisados são listados na Tabela 2.3. As médias $\pm$ erro-padrão ($n = 3$) para cada variável analisada foram representadas graficamente.

Tabela2.2. Contrastes estabelecidos e o efeito principal.

Contraste		Efeito Principal
C1	(Si) vs. (C)	Metassilicato
C2	(Si+G) vs. (C+G)	Metassilicato com Gesso
C3	(Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C)	Corretivos de Acidez com Gesso
C4	(T) vs. (G)	Gesso
C5	(T) vs. (Si)	Metassilicato
C6	(T) vs. (C)	Carbonato

*Si= CaSiO_3 ; C= CaCO_3 ; G= CaSO_4 ; T= Testemunha

Tabela2.3. Coeficientes dos contrastes analisados para os tratamentos avaliados.

Tratamento*	C1	C2	C3	C4	C5	C6
T	0	0	0	-1	-1	-1
G	0	0	0	1	0	0
C	1	0	1	0	0	1
Si	-1	0	1	0	1	0
C+G	0	1	-1	0	0	0
Si+G	0	-1	-1	0	0	0

*Si= CaSiO_3 ; C= CaCO_3 ; G= CaSO_4 ; T= Testemunha

Para a análise estatística foram utilizados os programas Statistica 8.0.55, para geração da ANOVA e quadrados médios dos contrastes, e o Microsoft Office Excel 2013, para cálculo do p-valor e geração de tabelas e dos gráficos com erro-padrão dos dados.

Segundo Alvarez V. & Alvarez (2006) o uso de contrastes é recomendado para se testar hipóteses quando as variáveis em estudo são qualitativas ou quantitativas em fatoriais. Dos seis contrastes analisados, o C1, C2 e C3 são ortogonais e o C4, C5 e C6 são contrastes adicionais.

Para facilitar a interpretação dos resultados dos contrastes médios, padronizou-se utilizar os coeficientes negativos para o primeiro termo e positivo para o segundo termo do contraste (Tabela 2.2 e 2.3). Dessa forma, o valor obtido do contraste médio indica se o tratamento comparativo fez aumentar ou diminuir a variável analisada.

Por exemplo, no C1 ($\overline{C1} = -Si + C$), caso o valor do contraste médio seja positivo e significativo para determinada variável, significa dizer que o valor obtido pelo $CaCO_3$ foi maior que o obtido pelo $CaSiO_3$. Sendo assim, o $CaCO_3$ possibilitou o aumento da variável em questão, em comparação ao $CaSiO_3$. Caso o valor do contraste médio seja negativo, significa dizer que o valor obtido pelo $CaCO_3$ foi menor que o obtido pelo $CaSiO_3$. Sendo assim, o $CaCO_3$ possibilitou a diminuição da variável em questão, em comparação ao $CaSiO_3$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Potencial Hidrogeniônico (pH)

Na Tabela 2.4 encontram-se os contrastes médios e respectivas significâncias para os valores de pH nas diferentes camadas de solo. Na Figura 2.1-A e B estão os valores médios $\pm$ erro-padrão do pH nas diferentes profundidades do solo cultivado com feijão (A) e arroz (B).

Não houve diferenças significativas ($p \geq 0,10$) quanto a mudança do pH nas diferentes profundidades avaliadas no LVAd ao se comparar o uso do CaCO_3 ao CaSiO_3 com ou sem a mistura de CaSO_4 (C1 e C2), indicando que ambos produtos tem eficiências equivalentes quanto a correção do pH do solo em profundidade, e essa eficiência da correção em profundidade independe do solo ser cultivado com arroz ou feijão (Tabela 2.4).

O contraste 3 (C3) indica que o pH obtido pela média dos corretivos de acidez (CaCO_3 e CaSiO_3) aplicados com CaSO_4 é igual ao pH obtido pela média dos corretivos de acidez aplicados sem CaSO_4 , isto é, o CaSO_4 , adicionado juntamente aos corretivos de acidez, não altera a eficiência da correção da acidez do solo na dose avaliada (Tabela 2.4).

Em comparação à testemunha, ao se aplicar o CaSO_4 no solo (C4) cultivado com feijão observou-se a diminuição do pH ($p < 0,01$) nas duas primeiras camadas do solo. No solo cultivado com arroz não houve diferença significativa ($p \geq 0,10$), evidenciando efeito distinto no solo cultivado com as diferentes espécies avaliadas. Nas camadas mais profundas (25 a 35 cm) houve aumento ($p < 0,05$) do pH ao se aplicar o CaSO_4 (C4 - Tabela 2.4).

Verificou-se que o pH foi elevado apenas nos primeiros 20 cm do solo, 5 cm abaixo de onde foi aplicado o corretivo (0 a 15 cm), tanto para o CaSiO_3 (C5) quanto para o CaCO_3 (C6), independente da espécie cultivada no solo, o que demonstra que ambos corretivos de acidez possuem baixa eficiência em elevar o pH do solo em maiores profundidades (Tabela 2.4 e Figura 2.1-A e B).

Na literatura há divergências entre os dados a respeito da eficiência da correção da acidez do solo entre esses dois corretivos, em profundidade. Segundo Calonego et al. (2012), analisando a efetividade de correção da acidez, em profundidade, de um PVAd (44 % de argila), concluíram que o metassilicato foi mais efetivo que o carbonato e Barbosa et al. (2003) observaram maior efeito do silicato em relação ao calcário na elevação do pH até 25 cm de profundidade do solo.

Tabela 2.4. Contrastes médios e suas significâncias para os valores médios de pH no solo (0 a 40 cm), cultivado com plantas de feijão e arroz.

Prof.	Contrastes - pH Feijão						Contrastes - pH Arroz					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0-5	-0,03 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,38 ^{**}	0,50 ^{**}	0,47 ^{**}	-0,12 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,61 ^{**}	0,49 ^{**}
05-10	0,09 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,31 ^{**}	0,85 ^{**}	0,94 ^{**}	0,06 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	1,11 ^{**}	1,17 ^{**}
10-15	0,16 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,95 ^{**}	1,11 ^{**}	-0,02 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	1,27 ^{**}	1,24 ^{**}
15-20	0,10 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,21 [°]	0,31 ^{**}	0,07 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,35 ^{**}	0,42 ^{**}
20-25	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
25-30	-0,12 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,23 [*]	0,12 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,02 ^{ns}
30-35	0,14 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,20 [°]	0,17 ^{ns}	0,32 ^{**}	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,20 [°]	0,13 ^{ns}	0,14 ^{ns}
35-40	0,00 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,40 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,04 ^{ns}

^{ns}, ^{**}, ^{*}, [°]: Não significativo, significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

C1= (Si) vs. (C); C2= (Si+G) vs. (C+G); C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C); C4= (T) vs. (G); C5= (T) vs. (Si); C6= (T) vs. (C).

Tabela 2.5. Contrastes médios e suas significâncias para os teores médios de Al³⁺ no solo (0 a 40 cm), cultivado com plantas de feijão e arroz.

Prof.	Contrastes - Al ³⁺ Feijão (cmol _c dm ⁻³)						Contrastes - Al ³⁺ Arroz (cmol _c dm ⁻³)					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0-5	0,03 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,44 ^{**}	-0,75 ^{**}	-0,71 ^{**}	-0,07 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,63 ^{**}	-0,70 ^{**}
05-10	0,09 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-1,74 ^{**}	-1,66 ^{**}	0,03 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-1,62 ^{**}	-1,59 ^{**}
10-15	-0,03 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-1,87 ^{**}	-1,90 ^{**}	-0,02 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-1,55 ^{**}	-1,57 ^{**}
15-20	-0,17 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,63 ^{**}	-0,80 ^{**}	-0,23 [°]	-0,45 ^{**}	-0,12 ^{ns}	-0,28 [*]	-0,59 ^{**}	-0,82 ^{**}
20-25	-0,17 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,31 [*]	-0,24 [°]	-0,42 ^{**}	0,00 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,23 [°]	-0,07 ^{ns}	-0,07 ^{ns}
25-30	-0,03 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,31 [*]	-0,10 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
30-35	-0,09 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	0,21 [°]	-0,07 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	-0,26 [*]	-0,05 ^{ns}
35-40	-0,02 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,33 [°]	-0,07 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,03 ^{ns}

^{ns}, ^{**}, ^{*}, [°]: Não significativo, significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

C1= (Si) vs. (C); C2= (Si+G) vs. (C+G); C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C); C4= (T) vs. (G); C5= (T) vs. (Si); C6= (T) vs. (C).

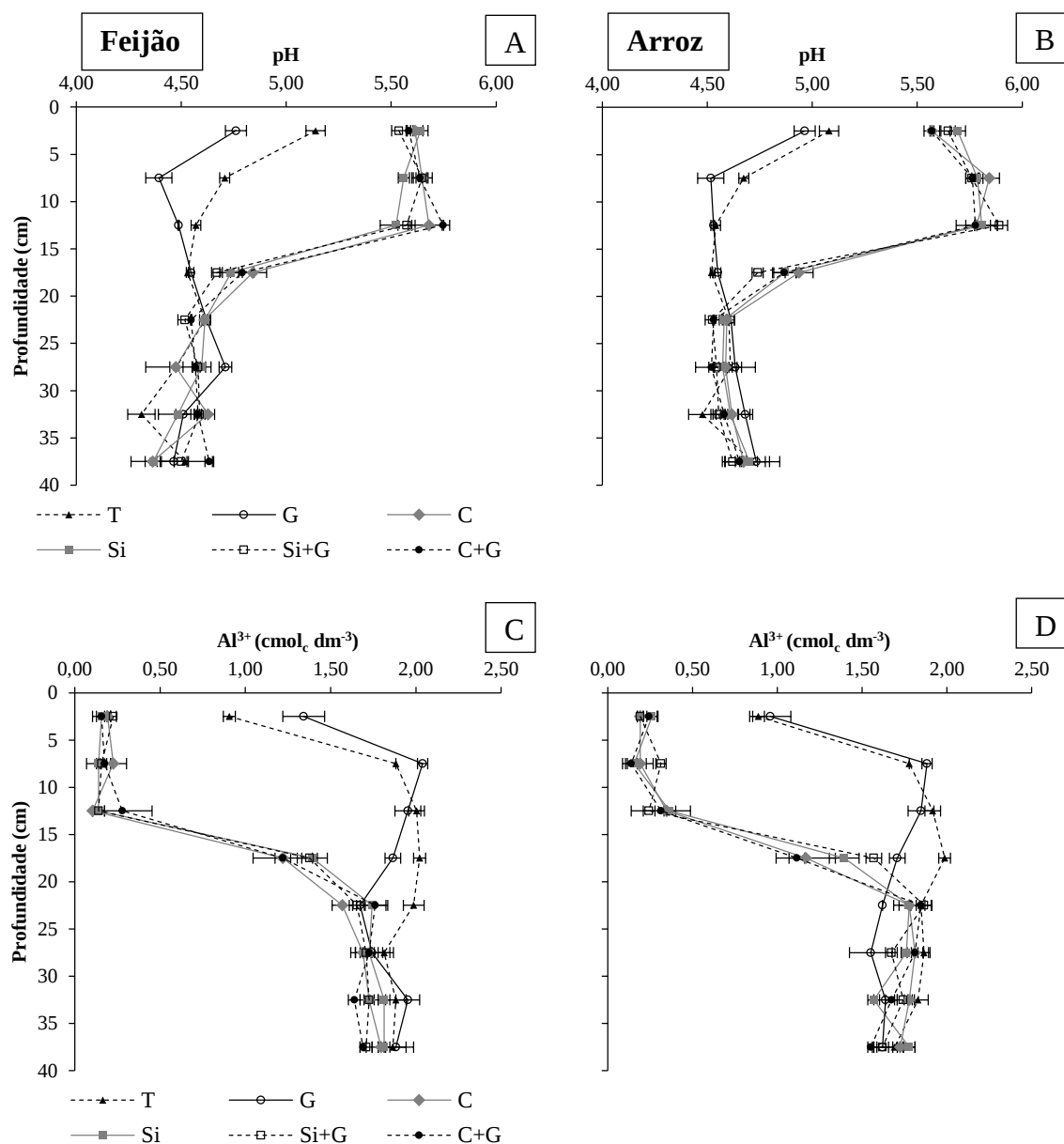


Figura 2.1. Valores de pH e Al^{3+} no solo cultivado com plantas de feijão (A e C) e arroz (B e D), sob os diferentes tratamentos, para cada camada de 5 cm do solo.

Ramos et al. (2006), avaliando a efetividade da correção da acidez em profundidade em lisímetros contendo Neossolo Quartzarênico Órtico típico (15,3 % de argila), concluíram que as fontes de silicatos utilizadas corrigiram a acidez do solo em profundidade com maior eficiência que o calcário, atribuindo tal resultado a maior solubilidade do metassilicato de cálcio e maior Kb_1 da base SiO_3^{2-} que a do CO_3^{2-} (Eq. 1.3 e 1.8, Capítulo I). Já, Figueiredo (2006) verificou que o $CaCO_3$ propiciou maior elevação do pH na camada de 21-28 cm (uma camada abaixo da que recebeu os corretivos) que pelo $CaSiO_3$, em um Latossolo com 15 % de argila, sendo essa diferença em menor magnitude no Latossolo com 77 % de argila.

Acidez Trocável (Al^{3+})

Na Tabela 2.5 encontram-se os contrastes médios e respectivas significâncias para os valores de Al^{3+} nas diferentes camadas de solo. Na Figura 2.1-C e D estão os valores médios $\pm$ erro-padrão do Al^{3+} nas diferentes profundidades do solo cultivado com feijão (C) e arroz (D).

Não houve diferença significativa ($p \geq 0,10$) quanto ao teor de Al^{3+} em profundidade ao se comparar o uso do $CaCO_3$ ao $CaSiO_3$, com ou sem a mistura de $CaSO_4$ (C1 e C2), quando o solo foi cultivado com feijão. No entanto, quando o solo foi cultivado com arroz, o $CaCO_3$ (com e sem o gesso) foi mais efetivo em diminuir o Al^{3+} ($p < 0,10$) na camada de 15-20 cm que o $CaSiO_3$ (C1, C2). A indicação é que $CaCO_3$ e $CaSiO_3$ possuem eficiências equivalentes quanto à correção do Al^{3+} do solo, sendo que o $CaCO_3$ combinado ao $CaSO_4$ proporcionou maior eficiência da correção em profundidade quando o solo foi cultivado com arroz (Tabela 2.5).

Corroborando com os resultados encontrados para o arroz nesse trabalho, Figueiredo (2006) verificou maior eficiência da diminuição do Al^{3+} pelo $CaCO_3$ em comparação ao $CaSiO_3$, principalmente quando foi associado ao $CaSO_4$, atribuindo tal resultado à maior movimentação do ânion HCO_3^- , em relação ao $HSiO_3^-$ devido à formação de pares iônicos apenas do primeiro, e com isso elevando o pH em maiores profundidades, precipitando o Al^{3+} na forma de $Al(OH)_3$.

O contraste 3 (C3) indica que o Al^{3+} obtido pela média dos corretivos de acidez ($CaCO_3$ e $CaSiO_3$) aplicados com $CaSO_4$ é igual ao Al^{3+} obtido pela média dos corretivos de acidez aplicados sem $CaSO_4$. Assim, o $CaSO_4$, combinado aos corretivos de acidez, não alterou a eficiência da neutralização Al^{3+} do solo na dose avaliada. No entanto, observou-se que o $CaSO_4$ diminuiu o teor de Al^{3+} na profundidade da camada de 20-25

cm, no solo cultivado com feijão, e na profundidade de 15-30 cm, no solo cultivado com arroz (C4). Tal resultado pode ser explicado pela maior mobilidade do par iônico CaSO_4^0 (Adams, 1971) que atinge maiores profundidades no solo, podendo haver, também, a formação do par iônico AlSO_4^+ que diminui a toxidez do Al para as plantas e não é detectado na análise titulométrica, como ocorre com o Al^{3+} .

A resposta de neutralização do Al^{3+} se assemelhou muito à do pH do solo (C5 e C6), isso se deve ao fato do Al^{3+} precipitar na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$ à medida que se aumenta o pH da solução do solo. Em valores de pH de 5,5 a 8,0 verifica-se os menores teores de Al na solução, predominando apenas a forma $\text{Al}(\text{OH})_3^0$, e em pH maior que 8,0 observam-se as formas aniônicas, como o $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (Lindsay, 1979; Mello & Perez, 2009).

Dessa forma, os resultados de Al^{3+} estão intimamente ligados à alteração do pH do solo provocado pelo uso dos corretivos de acidez. No entanto, o pH não é o único fator capaz de alterar a disponibilidade do Al^{3+} , pois o CaSO_4 também propiciou menor atividade de Al^{3+} onde não houve ação dos corretivos de acidez, devido à formação do par iônico AlSO_4^+ , como descrito anteriormente.

Cálcio Trocável (Ca^{2+})

Na Tabela 2.6 encontram-se os contrastes médios e respectivas significâncias para os valores de Ca^{2+} nas diferentes camadas de solo. Na Figura 2.2-A e B estão os valores médios $\pm$ erro-padrão do Ca^{2+} nas diferentes profundidades do solo cultivado com feijão (A) e arroz (B).

Ao se comparar os dois corretivos de acidez (C1), verificou-se que, quando se aplicou o CaCO_3 , o teor de cálcio só foi menor ($p < 0,01$) na camada de 0-5 cm no solo cultivado com feijão. Nas demais profundidades, para as duas espécies, o teor de cálcio foi maior quando se utilizou o CaCO_3 ao invés de CaSiO_3 , sendo superior ($p < 0,05$) até a camada de 25-30 cm do solo, no solo cultivado com feijão (Tabela 2.6). E quando o CaCO_3 foi combinado ao gesso (C2), o teor de Ca^{2+} foi superior até na última camada analisada (35-40 cm), quando comparado à combinação de $\text{CaSiO}_3 + \text{CaSO}_4$. Tais resultados demonstram que o CaCO_3 possibilitou maior movimentação de Ca^{2+} no perfil do solo comparado ao CaSiO_3 e quando combinado ao CaSO_4 a mobilidade foi ainda maior (Tabela 2.6).

De acordo com o C3, verifica-se que a combinação de gesso com os corretivos de acidez, em média, possibilitou maior movimentação de Ca^{2+} aumentando seu teor até a última camada de solo analisada (Tabela 2.6).

O uso isolado do CaSO_4 aumentou o Ca^{2+} ($p < 0,10$) nas camadas de 10-25 cm no solo cultivado com feijão e de 20-25 cm no solo cultivado com arroz (C4 – Tabela 2.6). Tal resultado pode estar ligado à menor dose de Ca^{2+} fornecida no tratamento contendo apenas o gesso, uma vez que a dose foi calculada com base no teor de argila do solo; outro motivo, somado ao primeiro, seria a intensa mobilidade de CaSO_4 , podendo ter saído pelo fundo do vaso durante as irrigações, por lixiviação, principalmente no solo cultivado com arroz, onde a demanda de água pela cultura foi menor.

A aplicação de CaSiO_3 propiciou elevação ($p < 0,01$) do teor de cálcio na camada de 0-30 cm no solo cultivado com feijão e de 0-35 cm no solo cultivado com arroz (C5). Já o CaCO_3 propiciou elevação ($p < 0,01$) do teor de cálcio na camada de 0-35 cm no solo cultivado com feijão e de 0-40 cm no solo cultivado com arroz (C6), demonstrando ser mais efetivo na mobilidade de cálcio no perfil do solo que o CaSiO_3 (Tabela 2.6).

Ramos et al. (2006) avaliando a mobilidade de bases e a efetividade da correção da acidez em profundidade em lisímetros contendo Neossolo Quartzarênico Órtico típico (15,3 % de argila), concluíram que as fontes de silicatos utilizadas aumentaram os teores de Ca^{2+} em profundidade com maior eficiência que o calcário. Esses autores atribuíram tal resultado à maior solubilidade do metassilicato de cálcio e ao maior K°_2 da base SiO_3^{2-} comparado ao do CO_3^{2-} (Eq. 1.3 e 1.8, Capítulo I).

No entanto, Figueiredo (2006), avaliando a mobilidade de Ca^{2+} aplicado em diferentes formas em dois Latossolos (15 e 77 % de argila) verificou que a ordem decrescente de mobilidade de acordo com o ânion acompanhante foi: $\text{NO}_3^- >> \text{SO}_4^{2-} >> \text{CO}_3^{2-} > \text{SiO}_3^{2-}$, sendo essas diferenças atenuadas no material mais argiloso. E, mesmo o metassilicato tendo maior solubilidade em água, verificou-se que a mobilidade de cálcio foi maior quando se utilizou a forma carbonato, atribuindo tal resultado às reações do CaCO_3 no solo, que, em uma etapa preliminar, levariam à formação do par iônico CaHCO_3^+ (Adams, 1971).

Tabela 2.6. Contrastes médios e suas significâncias para os teores médios de Ca^{2+} no solo (0-40 cm), cultivado com plantas de feijão e arroz.

Prof.	Contrastes - Ca^{2+} Feijão ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)						Contrastes - Ca^{2+} Arroz ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0-5	-0,48**	0,33°	-0,28 ^{ns}	0,04 ^{ns}	2,17**	1,69**	0,49**	-0,09 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,12 ^{ns}	1,61**	2,10**
05-10	0,70**	0,08 ^{ns}	0,64**	0,24 ^{ns}	3,41**	4,10**	0,84**	0,46**	0,39 ^{ns}	0,13 ^{ns}	2,59**	3,43**
10-15	1,50**	-0,15 ^{ns}	0,57*	0,36*	3,55**	5,05**	0,48**	0,18 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,18 ^{ns}	2,96**	3,44**
15-20	0,10 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,36*	1,38**	1,48**	0,41*	0,41*	0,41°	0,23 ^{ns}	1,09**	1,51**
20-25	0,21 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	0,32°	0,62**	0,83**	0,06 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,32°	0,60**	0,66**
25-30	0,38*	-0,11 ^{ns}	-0,97**	0,17 ^{ns}	0,31°	0,70**	0,13 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,54**	0,67**
30-35	0,15 ^{ns}	0,35*	-1,14**	0,06 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,12 ^{ns}	-0,66**	0,12 ^{ns}	0,39*	0,56**
35-40	0,05 ^{ns}	0,33°	-0,45°	0,09 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-1,08**	0,06 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,29°

^{ns}, **, *, °: Não significativo, significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

C1= (Si) vs. (C); C2= (Si+G) vs. (C+G); C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C); C4= (T) vs. (G); C5= (T) vs. (Si); C6= (T) vs. (C).

Tabela 2.7. Contrastes médios e suas significâncias para os teores médios de Mg^{2+} no solo (0-40 cm), cultivado com plantas de feijão e arroz.

Prof.	Contrastes - Mg^{2+} Feijão ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)						Contrastes - Mg^{2+} Arroz ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0-5	0,09 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,08 ^{ns}	-0,18*	0,33**	0,42**	0,28**	0,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,31**	0,59**
05-10	-0,05 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,39**	0,07 ^{ns}	0,61**	0,56**	0,18*	0,09 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,39**	0,57**
10-15	-0,22*	-0,09 ^{ns}	0,30*	0,22*	0,51**	0,30**	-0,04 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,30**	0,26**
15-20	-0,20*	-0,01 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,19*	0,14 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}
20-25	0,01 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,20*	-0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,20*	-0,02 ^{ns}	-0,04 ^{ns}
25-30	0,02 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,19*	0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,24*	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}
30-35	0,02 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,17°	0,05 ^{ns}	0,04 ^{ns}
35-40	0,05 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}

^{ns}, **, *, °: Não significativo, significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

C1= (Si) vs. (C); C2= (Si+G) vs. (C+G); C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C); C4= (T) vs. (G); C5= (T) vs. (Si); C6= (T) vs. (C).

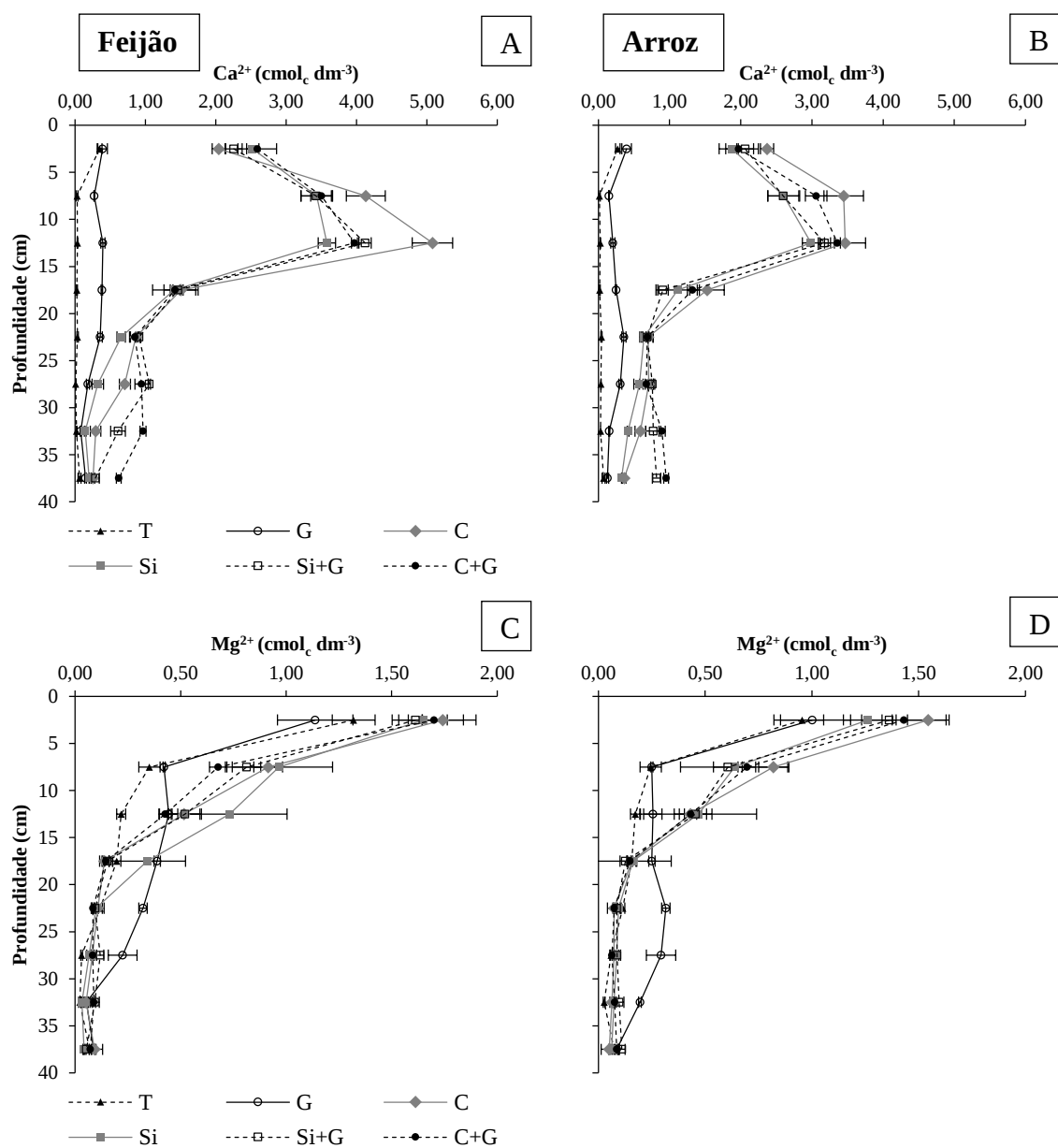


Figura 2.2. Valores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo cultivado com plantas de feijão (A e C) e arroz (B e D), sob os diferentes tratamentos, para cada camada de 5 cm do solo.

Magnésio Trocável (Mg^{2+})

Na Tabela 2.7 encontram-se os contrastes médios e respectivas significâncias para os valores de Mg^{2+} nas diferentes camadas de solo. Na Figura 2.2-C e D estão os valores médios $\pm$ erro-padrão do Mg^{2+} nas diferentes profundidades do solo cultivado com feijão (C) e arroz (D).

O teor de Mg^{2+} foi maior ($p < 0,01$) na camada de 10-20 cm quando se aplicou o $CaSiO_3$ em comparação ao $CaCO_3$, no solo cultivado com feijão (C1). No entanto, no solo cultivado com arroz, não houve essa diferença ($p \geq 0,10$), apenas na camada de 0-10 cm que houve maior ($p < 0,01$) teor de Mg^{2+} devido a aplicação do $CaCO_3$ (C1) (Tabela 2.7).

Quando combinado com gesso (C2), os dois corretivos de acidez do solo propiciaram os mesmos ($p \geq 0,10$) teores de Mg^{2+} nas diferentes camadas do solo cultivado com as duas espécies (Tabela 2.7).

Em comparação à testemunha, o gesso (C4) aumentou a mobilidade de Mg^{2+} , aumentando ($p < 0,05$) seu teor até a camada de 25-30 cm, no solo cultivado com feijão, e 30-35 cm no solo cultivado com arroz. A aplicação isolada do $CaSiO_3$ (C5) e do $CaCO_3$ (C6) e não elevaram os teores de Mg^{2+} abaixo da camada de 0-15 cm, ao comparar com a testemunha (Tabela 2.7).

Potássio Disponível (K)

Na Tabela 2.8 encontram-se os contrastes médios e respectivas significâncias para os valores de K nas diferentes camadas de solo. Na Figura 2.3-A e B estão os valores médios $\pm$ erro-padrão do K nas diferentes profundidades do solo cultivado com feijão (A) e arroz (B).

Não houve diferenças significativas ($p \geq 0,10$) quanto ao teor de K no solo em diferentes profundidades ao se compararem os corretivos CaCO_3 e CaSiO_3 , com e sem adição de CaSO_4 (C1e C2, Tabela 2.8), quando o solo foi cultivado com feijão ou arroz.

O uso isolado do gesso, em comparação à testemunha (C4, Tabela 2.8), fez com que os teores de K diminuíssem ($p < 0,01$) na camada de 0-20 cm do solo cultivado com feijão havendo tendência de aumento nas camadas inferiores, no entanto esses aumentos não foram significativos ($p \geq 0,10$). No solo cultivado com arroz, houve diminuição dos teores de K nas camadas mais superficiais e aumento expressivo na camada de 30-35 cm (Tabela 2.8).

A aplicação de CaSiO_3 e CaCO_3 levou à diminuição do teor de K do solo nas maiores profundidades, em comparação a testemunha (C5 e C6, Tabela 2.8; Figura 2.3-A e B). Tal resultado pode estar ligado ao maior crescimento das plantas nos tratamentos contendo os corretivos em comparação à testemunha, principalmente no feijão (Figura 3.1, Capítulo III), o que promoveu maior absorção de K pela planta, diminuindo sua concentração na solução do solo e, conseqüentemente, a quantidade do cátion mobilizada para as camadas mais profundas.

Observa-se que com a aplicação dos corretivos (tratamentos Si e C), no solo cultivado com feijão a mobilidade de K foi ainda menor em comparação ao solo cultivado com arroz (Figura 2.3 – A e B). Essa observação coincide com os resultados para conteúdo de K nas plantas cultivadas no solo que recebeu os tratamentos Si e C, que apresentaram conteúdos maiores do que as plantas do tratamento T (Figura 3.5-D, Capítulo III).

Tabela 2.8. Contrastes médios e suas significâncias para os teores médios de K no solo (0-40 cm), cultivado com plantas de feijão e arroz.

Prof.	Contrastes - K Feijão (mg dm ⁻³)						Contrastes – K Arroz (mg dm ⁻³)					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0-5	39,7 ^{**}	7,8 ^{ns}	30,3 ^{ns}	-74,5 ^{**}	-16,6 ^{ns}	23,0 [°]	-5,4 ^{ns}	9,6 ^{ns}	-9,0 ^{ns}	13,6 ^{ns}	12,3 ^{ns}	6,9 ^{ns}
05-10	11,0 ^{ns}	18,9 ^{ns}	11,0 ^{ns}	-77,9 ^{**}	-80,1 ^{**}	-69,1 ^{**}	7,9 ^{ns}	-8,9 ^{ns}	-20,8 ^{ns}	-58,6 ^{**}	28,9 [*]	36,8 ^{**}
10-15	-1,2 ^{ns}	14,4 ^{ns}	0,9 ^{ns}	-35,3 ^{**}	-42,8 ^{**}	-44,0 ^{**}	9,0 ^{ns}	-21,0 ^{ns}	-2,7 ^{ns}	10,8 ^{ns}	32,6 [*]	41,6 ^{**}
15-20	-10,2 ^{ns}	-1,3 ^{ns}	9,4 ^{ns}	-21,9 [°]	-36,0 ^{**}	-46,2 ^{**}	17,2 ^{ns}	12,2 ^{ns}	-1,2 ^{ns}	-36,0 ^{**}	-43,8 ^{**}	-26,6 [*]
20-25	-8,3 ^{ns}	2,6 ^{ns}	-5,6 ^{ns}	-21,0 ^{ns}	-36,0 ^{**}	-44,3 ^{**}	12,0 ^{ns}	11,0 ^{ns}	-8,6 ^{ns}	-10,1 ^{ns}	-45,8 ^{**}	-33,8 [*]
25-30	-10,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	-33,3 [°]	11,6 ^{ns}	-3,2 ^{ns}	-13,3 ^{ns}	6,3 ^{ns}	5,1 ^{ns}	-19,1 ^{ns}	4,8 ^{ns}	-29,0 [*]	-22,7 [°]
30-35	-7,5 ^{ns}	-12,3 ^{ns}	-22,5 ^{ns}	8,0 ^{ns}	19,9 ^{ns}	12,4 ^{ns}	-1,6 ^{ns}	3,0 ^{ns}	-9,1 ^{ns}	31,1 [*]	7,6 ^{ns}	5,9 ^{ns}
35-40	-8,6 ^{ns}	12,1 ^{ns}	-7,0 ^{ns}	8,6 ^{ns}	15,4 ^{ns}	6,8 ^{ns}	-6,0 ^{ns}	5,1 ^{ns}	-5,9 ^{ns}	-2,9 ^{ns}	0,2 ^{ns}	-5,8 ^{ns}

^{ns}, ^{**}, ^{*}, [°]: Não significativo, significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

C1= (Si) vs. (C); C2= (Si+G) vs. (C+G); C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C); C4= (T) vs. (G); C5= (T) vs. (Si); C6= (T) vs. (C).

Tabela 2.9. Contrastes médios e suas significâncias para os teores médios de Si, extraído com ácido acético, no solo (0-40 cm), cultivado com plantas de feijão e arroz.

Prof.	Contrastes - 'Si-HAc' Feijão (mg dm ⁻³)						Contrastes - 'Si-HAc' Arroz (mg dm ⁻³)					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0-5	-21,25 ^{**}	-18,49 ^{**}	-1,73 ^{ns}	-3,52 ^{ns}	16,11 ^{**}	-5,14 ^{ns}	-24,88 ^{**}	-18,34 ^{**}	-3,72 ^{ns}	-1,23 ^{ns}	20,95 ^{**}	-3,92 ^{ns}
05-10	-51,52 ^{**}	-60,79 ^{**}	-7,08 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	43,54 ^{**}	-7,98 [*]	-48,10 ^{**}	-32,23 ^{**}	2,01 ^{ns}	-3,80 ^{ns}	45,22 ^{**}	-2,88 ^{ns}
10-15	-49,86 ^{**}	-52,54 ^{**}	-8,69 ^{ns}	-9,01 [*]	41,61 ^{**}	-8,25 [*]	-54,10 ^{**}	-54,48 ^{**}	-13,04 [*]	-6,26 ^{ns}	43,92 ^{**}	-10,18 [*]
15-20	-7,87 [*]	-15,96 ^{**}	5,66 ^{ns}	-4,35 ^{ns}	-1,53 ^{ns}	-9,40 [*]	-7,78 [°]	-5,28 ^{ns}	-2,04 ^{ns}	-10,89 ^{**}	1,78 ^{ns}	-6,01 ^{ns}
20-25	-5,88 ^{ns}	-5,07 ^{ns}	3,96 ^{ns}	-2,12 ^{ns}	-3,62 ^{ns}	-9,50 [*]	-3,26 ^{ns}	-2,90 ^{ns}	-8,74 ^{ns}	-0,90 ^{ns}	-3,58 ^{ns}	-6,85 [°]
25-30	-3,22 ^{ns}	-2,79 ^{ns}	2,69 ^{ns}	-8,38 [*]	-5,65 ^{ns}	-8,87 [*]	-7,61 [°]	-5,72 ^{ns}	-5,70 ^{ns}	-0,75 ^{ns}	-0,70 ^{ns}	-8,31 [*]
30-35	-0,28 ^{ns}	0,50 ^{ns}	-5,15 ^{ns}	-3,30 ^{ns}	-7,32 [°]	-7,60 [°]	-7,52 [°]	-4,70 ^{ns}	-4,36 ^{ns}	-3,41 ^{ns}	0,30 ^{ns}	-7,23 [°]
35-40	2,93 ^{ns}	-2,01 ^{ns}	-7,03 ^{ns}	-3,97 ^{ns}	-8,58 [*]	-5,65 ^{ns}	-3,79 ^{ns}	1,60 ^{ns}	-5,37 ^{ns}	4,51 ^{ns}	3,22 ^{ns}	-0,58 ^{ns}

^{ns}, ^{**}, ^{*}, [°]: Não significativo, significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

C1= (Si) vs. (C); C2= (Si+G) vs. (C+G); C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C); C4= (T) vs. (G); C5= (T) vs. (Si); C6= (T) vs. (C).

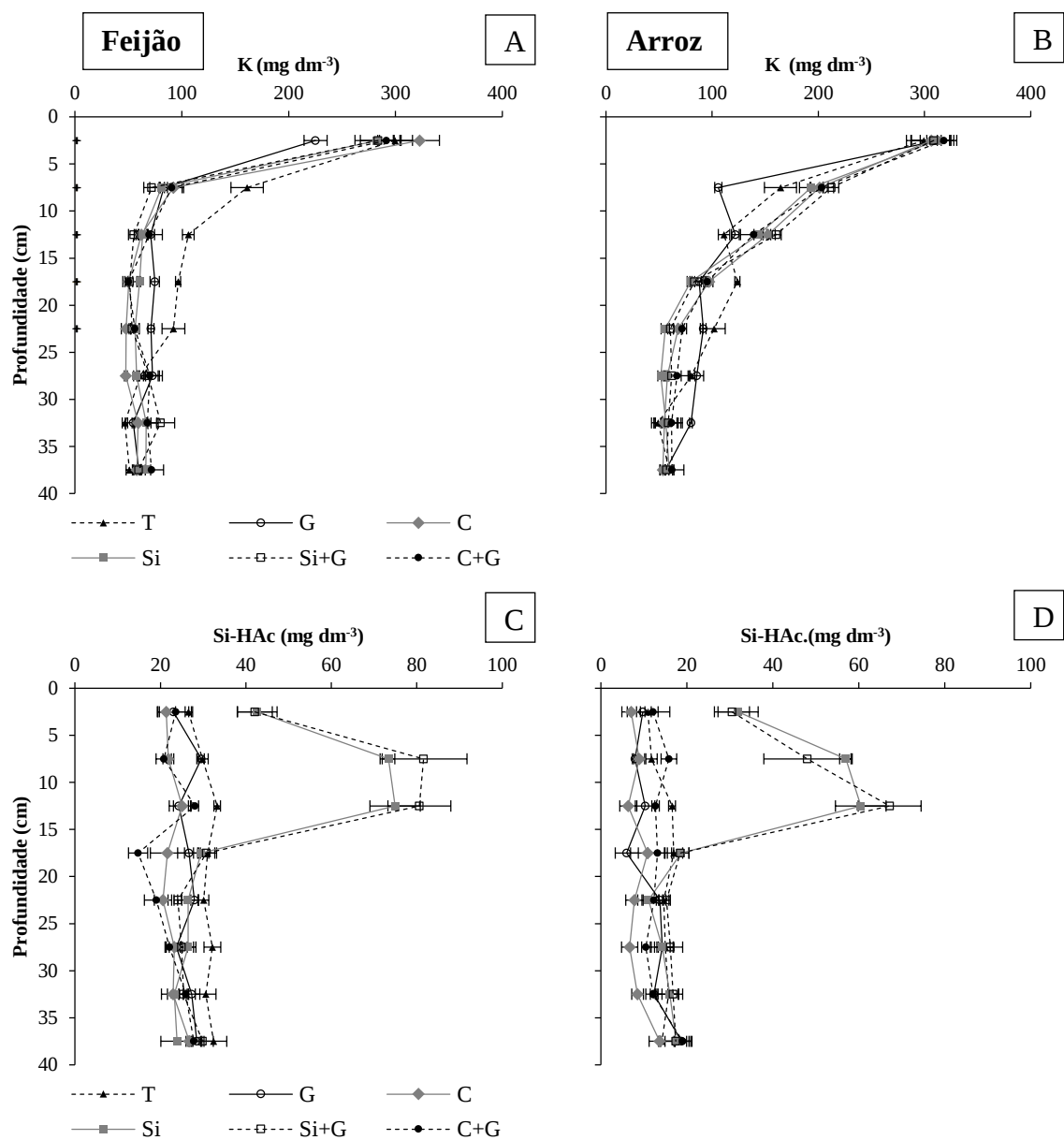


Figura 2.3. Valores de K e Si solúvel no solo cultivado com plantas de feijão (A e C) e arroz (B e D), sob os diferentes tratamentos, para cada camada de 5 cm do solo.

Silício Extraído por Ácido Acético (Si-HAc)

Na Tabela 2.9 encontram-se os contrastes médios e respectivas significâncias para os valores de Si-HAc nas diferentes camadas de solo. Na Figura 2.3-C e D, estão os valores médios $\pm$ erro-padrão do Si-HAc nas diferentes profundidades do solo cultivado com feijão (C) e arroz (D).

O silício solúvel foi extraído do solo com solução extratora de ácido acético 0,5 mol L⁻¹. O ácido acético 0,5 mol L⁻¹ tem a capacidade de extrair formas solúveis de silício do solo, principalmente o H₄SiO₄ e oligômeros deste, devido à acidez da solução desfazer alguns polímeros de silício liberando H₄SiO₄ (reação da direita para esquerda da Eq. 1.9, Capítulo I).

O teor de silício extraído pelo ácido acético 0,5 mol L⁻¹ aumentou ($p < 0,01$) ao se aplicar CaSiO₃ em comparação ao CaCO₃, com ou sem (C1 e C2) adição de gesso, o que ocorreu devido à presença do Si no CaSiO₃. No entanto, verificou-se baixa mobilidade do H₄SiO₄, uma vez que seu teor aumentou apenas na camada de 5 cm abaixo da camada onde foi aplicado o CaSiO₃ (Tabela 2.9).

Quando comparado à testemunha, a aplicação do CaSiO₃ não aumentou o teor de Si abaixo da camada de 0-15 cm (C5, Tabela 2.9), o que sugere pouca mobilidade do elemento químico nessas condições. Tal resultado pode ser explicado pelas reações de polimerização do H₄SiO₄ no solo (Eq. 1.10, Capítulo I), onde o H₄SiO₄ oriundo da neutralização de acidez pelo CaSiO₃ pode se polimerizar ao atingir concentrações elevadas na solução do solo, assim como ser adsorvido às superfícies das argilas (bordas quebradas da caulinita ou nos óxidos de ferro e alumínio). Parece que além de sua polimerização, o Si em suas formas solúveis tem alta afinidade pela fase sólida do solo, sendo que a adsorção às superfícies das argilas acarreta baixa mobilidade no solo.

A aplicação do CaCO₃ em comparação à testemunha diminuiu ($p < 0,05$) os teores de formas solúveis de silício no solo (C6, Tabela 2.9). Isso ocorreu até nas camadas mais profundas, provavelmente devido ao maior crescimento das plantas que absorveram mais Si, causando diminuição desse elemento nas formas mobilizadas no perfil do solo.

As concentrações de Si solúvel foram menores no solo cultivado com arroz que no solo cultivado com feijão (Figura 2.3, C e D). Tal resultado parece estar relacionado à capacidade de cada espécie em absorver o Si do solo, sendo que o arroz é mais eficiente para absorver o H₄SiO₄.

CONCLUSÕES

1. O CaSiO_3 e CaCO_3 têm capacidades semelhantes de corrigir o pH do solo em profundidade, com ou sem adição do CaSO_4 ;
2. O CaCO_3 promoveu maior movimentação de Ca^{2+} que o CaSiO_3 e menor de Mg^{2+} , sendo maior a mobilidade de Mg^{2+} quando aplicado o CaSO_4 ;
3. A mobilidade de K diminuiu devido ao maior crescimento das plantas e não pela aplicação dos corretivo;
4. A afinidade do silício pela fase sólida do solo e apolimerização do mesmo diminuíram sua mobilidade no solo.

LITERATURA CITADA

ADAMS, F. Ionic concentrations and activities in soil solutions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35:420-426, 1971.

ALCARDE, J. C. Corretivo de acidez dos solos: características e interpretações técnicas. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1992. 26 p. (Boletim Téc. 6).

ALCARDE, J.A. & RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A. S. & ALVAREZ V., V.H., eds. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.291-334, 2003.

ALVAREZ V., V.H. & ALVAREZ, G.A.M. Comparações de médias ou testes de hipóteses? *Contrastes! B. Inf. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 31:24-34, 2006.

ALVAREZ V., V. H., DIAS, L. E., RIBEIRO, A. C. & SOUZA, R. B. Uso de Gesso Agrícola. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.67-78.

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. & DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28: 115-123, 2004.

AZEVEDO, A. C.; KÄMPF, N. & BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. *R. Bras. Ci. Solo*, Campinas, SP, v. 20, 2: 191 – 198, 1996.

BARBOSA, D.S.; CAMARGO, M.S.; RAMOS, L.A.; RESENDE, R.H.; ARRUDA, D.; KORNDÖRFER, G.H. & PEREIRA, H.S. Comparação entre silicato e calcário na correção do solo e no fornecimento de silício em profundidade. In: 29º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto. *Anais...* Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. & FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície

em sistema de cultivo sem preparo do solo. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, MG, 22, 1: 27 – 34, 1998.

CALONEGO, J. C.; MORA, V. S.; SANTOS, C. H & OLIVEIRA, L. Calagem e silicatagem em solo incubado com diferentes umidades. Colloquium Agrariae, 8, 2: 46-56, 2012.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FERNANDES, L.A. & OLIVEIRA JUNIOR, A.C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. R. Bras. Ci. Solo, 24, 1: 69-74, 2000.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A.E. & SANTOS, C.D. et al. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. Pesq. Agropec. Bras., 36, 3: 557-565, 2001.

CESSA, R. M. A., NOVELINO, J. O., VITORINO, A. C. T. & MAUAD, M.; Absorção de fósforo e crescimento do Sorgo em função da aplicação de silício e fósforo em Latossolo Vermelho distroférico. Rev. de Ci. Agr., 34, 1: 135-142, 2011

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

FIGUEIREDO, G. C. Movimentação de cálcio de diferentes fontes adicionadas em colunas de dois latossolos 2012. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006, 60 p.

HOLT, P.F. & KING, D.T. The chemistry of silica surfaces. J. Chem. Soc., 4:773-779, 1955.

ILER, R. K. The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry. Wiley-Interscience, New York, 1979.

LEITE, P.C. Interação silício – fósforo em Latossolo Roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997, 87 p.

LINDSAY, W.L. Chemical equilibria in soils. New York: John Wiley & Sons, 1979. 449p.

MELLO, J. W. V. & PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). Química e mineralogia do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 1 p. 151-250.

MIRANDA, L. N. & MIRANDA, J. C. C. de. Efeito residual do calcário na produção de milho e soja em solo Glei Pouco Húmico. R. Bras. Ci. Solo, 24, 1: 209 – 215, 2000.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L. & BARROS, N. F. de. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. et al. (Coords.). Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. Brasília, DF: Embrapa-SEA, 1991. p. 189-253.

OLIVEIRA, M. R. de. Aplicação de escória de aciaria e calcário no solo e desenvolvimento do primeiro ciclo da grama bermuda. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP, 2012, 63 p.

PEREIRA, H. S.; BARBOSA, N. C.; CARNEIRO, M. A. C. & KORNDÖRFER, G. H. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. Pesq. Agrop. Bras., 42: 239 - 247, 2007.

PRADO, R.M. & FERNANDES, F.M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. Sci. Agric., 57:739-744, 2000.

RAMOS, L.A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S. & CAMARGO, M.S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. R. Bras. Ci. Solo, 30: 849-857, 2006.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E. & COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of Savannah Oxisols. Soil Sci.133, 3: 378 – 382, 1982.

RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (Silte + Argila). R. Bras. Ci. Solo, 29:297-300, 2005.

RUIZ, H.A.; FERREIRA, G.B. & PEREIRA, J.B. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. R. Bras. Ci. Solo, 27:389-393, 2003.

SÁ, J.C. de M. Manejo da Fertilidade do solo no plantio direto. Castro: Fundação ABC, 1993. 94p.

SILVA, F.C. (ed.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2009. 627 p.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; CARVALHO, R.; TORRES, P. R. F.& POZZA, A. A. A. Atributos químicos de solos influenciados pela substituição do carbonato por silicato de cálcio. R. Bras. Ci. Solo, 32:1563-1572, 2008.

CAPÍTULO III

INFLUÊNCIA DO METASSILICATO DE CÁLCIO NO CRESCIMENTO E ACÚMULO DE ELEMENTOS QUÍMICOS EM ARROZ E FEIJÃO CULTIVADOS EM UM LATOSSOLO

INTRODUÇÃO

O decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, do Ministério da Agricultura incluiu, na legislação de fertilizantes, a classificação do silício como micronutriente (Brasil, 2004). Entretanto, a essencialidade do silício é uma questão polêmica e sempre gera discussões quando é levantada. Atualmente, o Si é comprovadamente considerado nutriente somente para as algas das famílias das Diatomáceas e Chrysophyceae e plantas da família Equisetaceae (pteridófitas), não tendo sido comprovada sua essencialidade para nenhuma espécie de plantas superiores (Epstein, 1999; Guntzer et al., 2012).

Sabe-se que o Si é aceito cientificamente como elemento benéfico às plantas, entretanto, de acordo com o decreto supracitado, ele pode ser enquadrado como nutriente, uma vez que tal decreto define nutriente como “elemento essencial ou benéfico para o crescimento e produção dos vegetais”. Essa definição de nutriente, entretanto, não atende os critérios regularmente usados na ciência do solo e nutrição de plantas, onde um elemento para ser considerado nutriente deve atender a três critérios de essencialidade (Arnon & Stout, 1939): 1- a ausência do elemento impede que a planta complete seu ciclo; 2- a deficiência do elemento é específica, podendo ser prevenida ou corrigida somente mediante o seu fornecimento; 3- O elemento deve estar diretamente envolvido na nutrição da planta, sendo que sua ação não pode decorrer de correção eventual de condições químicas ou microbiológicas desfavoráveis do solo.

Portanto, nutriente é um elemento essencial, diante disto ainda não ficou provada a essencialidade do Si para as plantas superiores, devido ao não atendimento de um ou mais destes critérios de essencialidade. Segundo o trabalho de revisão de Guntzer et al. (2012), Sachs (1862) foi um dos primeiros cientistas a discutir a essencialidade do Si. Ele observou que plantas de milho não alteraram sua produtividade ao possuir 0,3 ou 9 % de Si nas cinzas, considerando o Si um elemento não essencial.

Epstein (1994) sugere que a não descoberta da essencialidade do Si se deve à dificuldade de remover totalmente o Si das soluções nutritivas experimentais. Epstein (1999) sugeriu que o Si fosse chamado de “elemento quase essencial”, pois, mesmo não atendendo os critérios de essencialidade na maioria das plantas, na prática, ele tem enorme importância para diversas espécies, principalmente as acumuladoras de Si.

Outro questionamento que ocorre no decreto referido acima é que o Si foi classificado como micronutriente, mas suas características são de macronutriente uma vez que segundo Taiz & Zeiger (2002) sua concentração média na matéria seca é igual a 1 g kg⁻¹. Na verdade, há uma alta variabilidade dos teores de Si nas plantas, variando de 1 a 100 g kg⁻¹ na matéria seca (Ma et al., 2001). Isto se deve aos teores disponíveis no solo e a capacidade intrínseca de cada espécie em absorver Si.

Em relação à ciência do solo e nutrição de plantas, ressalta-se a importância do decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004 que ao incluir o Si como nutriente na legislação de fertilizantes, abriu a possibilidade de comercialização de produtos contendo tal elemento como insumo agrícola. Essa inclusão, junto com outras leis, permite que se exija dos fabricantes destes produtos a adoção de critérios que regulem os teores mínimos de Si nos materiais, assim como o controle de características como pureza, granulometria, e poder de neutralização, importantes para conferir qualidade aos produtos e para sua utilização com segurança na agricultura.

A alta variabilidade dos teores de Si nas plantas permite classificá-las em três grupos: 1- As acumuladoras de silício, que têm processo ativo de absorção desse elemento, possuem teor foliar acima de 10 g kg⁻¹ de silício na matéria seca e mostram relação molar de Si/Ca maior que 1 mol mol⁻¹; 2- As intermediárias na acumulação de silício, com o teor foliar entre 5 e 10 g kg⁻¹ ou até mesmo superior a 10 g kg⁻¹, mas com a relação molar de Si/Ca menor que 1 mol mol⁻¹; e as não acumuladoras, com teor foliar menor que 5 g kg⁻¹ de silício na matéria seca (Ma et al. , 2001).

O arroz enquadra-se como planta acumuladora de Si, já o feijão é classificado como planta não acumuladora. Desta forma, ao se aplicar fontes de Si ao solo, espera-se maior absorção do mesmo na cultura do arroz do que na do feijão, o que pode resultar em resposta diferenciada entre as culturas como resultado da ação desse elemento na planta.

Dentre as vantagens e melhorias que o Si proporciona às plantas, Epstein (2001) cita: o aumento do crescimento e produção; resistência ao acamamento; melhoria na

exposição favorável das folhas à luz, favorecendo a fotossíntese; efeitos sobre as propriedades da superfície foliar; resistência a patógenos e herbívoros; resistência ao estresse salino; redução do estresse hídrico; proteção contra temperaturas extremas; melhoria da formação de nódulos em leguminosa; efeitos sobre a atividade enzimática; efeitos sobre a composição mineral; e resistência à toxicidade de metais pesados, alumínio e outros elementos tóxicos.

O Si no solo proporciona a atuação de mecanismos, isoladamente ou em conjunto, que atuam de acordo com as condições do solo. Sabe-se que os mecanismos de redução do teor de Al^{3+} no solo pela adição de metassilicatos estão relacionados ao aumento do pH do solo; à adsorção de Si aos óxidos de Al, com redução de sua mobilidade devido à formação de hidroxialuminossilicatos pouco solúveis; à adsorção do Al móvel em superfícies silicatadas; ao aumento de formas solúveis de Si que aumenta a tolerância das plantas ao Al (Carvalho et al., 2000; Reis, 2000, Matichenkov & Bocharnikova, 2001; Reis et al., 2013).

O Si é um elemento químico promissor para utilização como insumo agrícola. Sendo assim, estudos que enfoquem o uso de fertilizantes e ou corretivos contendo Si devem ser implementados para avaliar sua contribuição para uma agricultura mais produtiva e competitiva, além de preencher algumas lacunas a respeito do conhecimento de seus efeitos na planta.

Objetivou-se com esse trabalho avaliar a influência da aplicação, via solo, do $CaSiO_3$ no crescimento de plantas de arroz e feijão assim como no acúmulo de Si, Al, N, Ca, Fe, Mn, Mg e K nas plantas cultivadas em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd).

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi montado e conduzido como descrito no Capítulo II. As plantas foram colhidas 38 dias após a emergência, medindo-se a largura e comprimento de cada folha para estimar a área foliar. A parte aérea foi separada da radicular e as folhas lavadas em água deionizada para remoção de contaminantes.

A área foliar (AF) do feijoeiro foi estimada de acordo com a fórmula proposta por Figueiredo et al. (2012)

$$AF = \sum [0,441 \times (C \times L)^{1,057}] \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Em que:

AF= Área foliar total da planta, em cm²;

C = Comprimento de cada folha, em cm;

L = Maior largura de cada folha, em cm.

A área foliar (AF) do arroz foi estimada de acordo com a fórmula (Mortele,2011)

$$AF = \sum (0,75 \times C \times L) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Em que:

AF= Área foliar total da planta, em cm²;

C = Comprimento de cada folha, em cm;

L = Largura da região mediana de cada folha, em cm.

A parte aérea das plantas foi acondicionada em sacos de papel para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C por duas semanas para a determinação da massa da matéria seca.

Os tubos de PVC onde as plantas cresceram foram desmontados de modo a individualizar os anéis de 5 cm de espessura, procedendo-se a retirada manual das raízes das camadas de solo contidas em cada um dos anéis (perfazendo toda a camada 0 a 40 cm de profundidade). As raízes foram lavadas em água corrente tratada e acondicionadas em

sacos de papel para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C por duas semanas para a determinação da massa da matéria seca.

A matéria seca da parte aérea e radicular foram medidas em balança de precisão e então as folhas foram moídas em moinho tipo Willey e passadas por peneira de 1 mm.

A análise química das amostras das folhas foi realizada a partir da extração dos elementos através da digestão sulfúrica (N) e digestão nitro-perclórica (Al, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe e Zn). A dosagem do N foi feita pelo método Kjeldahl; o Al, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn e Zn foram dosados no ICP-OES de acordo com a metodologia descrita por Silva (2009). Para a extração do Si foi realizada a calcinação das amostras foliares, em seguida a cinza obtida foi transferida para tubos tipo Falcon de 15 mL, contendo 10 mL de NaOH 1 mol L⁻¹. Os tubos foram tampados e colocados em banho-maria a 90 °C por 6 h, agitando-se a cada 30 min de acordo com a metodologia descrita por Costa et al. (2010). A dosagem do Si, obtido no extrato, foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica (EAA).

Análise Estatística

A análise estatística foi realizada de forma diferente à descrita no Capítulo II. Considerou-se o experimento montado em DBC, no esquema fatorial 2 x 6, correspondendo às duas culturas (arroz e feijão) e às 5 combinações dos corretivos nos tratamentos mais a testemunha (Tabela 2.1, Capítulo II).

Todos os dados foram submetidos à análise de variância. Os efeitos dos corretivos de acidez (metassilicato e carbonato de cálcio) e gesso para cada planta (arroz e feijão) foram avaliados por meio de contrastes médios (Tabela 3.1). Os coeficientes dos contrastes analisados são listados na Tabela 3.2. As médias $\pm$ erro-padrão para cada variável analisada foram representadas graficamente.

Tabela 3.1. Contrastes estabelecidos e o efeito principal.

Contraste*		Efeito Principal
C1	(Si) vs. (C)	Metassilicato
C2	(Si+G) vs. (C+G)	Metassilicato com Gesso
C3	(Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C)	Gesso com Corretivo
C4	(T) vs. (G)	Gesso
C5	(T) vs. (Si)	Metassilicato
C6	(T) vs. (C)	Carbonato

*Si= CaSiO_3 ; C= CaCO_3 ; G= CaSO_4 ; T= Testemunha

Tabela 3.2. Coeficientes dos contrastes analisados para os tratamentos avaliados.

Tratamento*	C1	C2	C3	C4	C5	C6
T	0	0	0	-1	-1	-1
G	0	0	0	1	0	0
C	1	0	1	0	0	1
Si	-1	0	1	0	1	0
C+G	0	1	-1	0	0	0
Si+G	0	-1	-1	0	0	0

*Si= CaSiO_3 ; C= CaCO_3 ; G= CaSO_4 ; T= Testemunha

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Crescimento das plantas

Na Tabela 3.3 estão os contrastes médios para as variáveis de crescimento das plantas de feijão e arroz. As médias $\pm$ erro-padrão das variáveis analisadas para cada tratamento encontram-se na Figura 3.1 (A-E)

A massa da parte aérea (MPA) da planta de feijão foi maior ($p < 0,05$) quando se utilizou o CaSiO_3 ao invés do CaCO_3 , com ou sem gesso (C1 e C2; Tabela 3.3). No arroz, o CaSiO_3 aumentou a MPA ($p < 0,05$), em comparação ao CaCO_3 , apenas quando foi aplicado juntamente ao gesso (C2 –Tabela 3.3; Figura 3.1-A).

O uso do CaSO_4 , CaCO_3 e CaSiO_3 , em comparação à testemunha, promoveu maior MPA da planta de feijão, sendo que na planta de arroz, apenas o CaSiO_3 e CaCO_3 aumentaram ($p < 0,05$) a MPA (C4, C6 e C5, Tabela 3.3). Possivelmente, a diferença respostas entre as duas culturas se deve ao fato de a cultura do arroz ser mais tolerante à baixa fertilidade do solo e menos exigente em nutrientes do que o feijoeiro. Mas, mesmo sendo uma planta menos exigente em fertilidade, o arroz também foi beneficiado em condições de alta disponibilidade de Si solúvel (H_4SiO_4) e maior pH.

A massa da parte radicular (MPR) do feijoeiro não diferiu ($p \geq 0,10$) ao se comparar a aplicação do CaCO_3 com CaSiO_3 , com ou sem gesso (C1, C2, C3), mas aumentou significativamente ($p < 0,01$) ao aplicar gesso, CaCO_3 ou CaSiO_3 , em comparação à testemunha (C4, C5 e C6) (Tabela 3.3; Figura 3.1-B). No arroz, apenas o CaSiO_3 promoveu aumento ($p < 0,10$) da MPR, em comparação à testemunha (C5), não havendo diferenças significativas ($p \geq 0,10$) para os demais contrastes avaliados (Tabela 3.3; Figura 3.1-B).

A área foliar (AF) da planta de feijão aumentou ($p < 0,01$) ao aplicar CaCO_3 , com ou sem gesso (C1 e C2), em comparação à aplicação do CaSiO_3 . Em relação à testemunha, o uso isolado do CaSO_4 (C4), do CaSiO_3 (C5) e do CaCO_3 (C6), aumentaram ($p < 0,01$) a AF da planta de feijão e de arroz (Tabela 3.3; Figura 3.1 C).

Houve diminuição ($p < 0,01$) da área foliar específica (AFEsp) da planta de feijão, quando se aplicou CaSO_4 (C4), CaCO_3 (C6) e CaSiO_3 (C5), em comparação à testemunha. A AFEsp aumentou ($p < 0,10$) ao se utilizar o CaCO_3 em comparação ao CaSiO_3 (Tabela 3.3; Figura 3.1 D). No arroz houve pouca alteração na AFEsp, mas esta diminuiu quando aplicou-se o CaSiO_3 (C1 e C5) (Tabela 3.3; Figura 3.1-D).

A relação entre a massa da parte aérea e radicular (PA/PR) não sofreu alteração nos tratamentos avaliados, não havendo significância nos contrastes testados. O valor da PA/PR variou de 2 a 2,5 (Figura 3.1-E).

Tabela 3.3. Contrastes médios e suas significâncias para o crescimento médio da planta de feijão e arroz.

Contraste	Crescimento da Planta de Feijão				
	MPA g	MPR g	AF cm ²	AFEsp m ² kg ⁻¹	PA/PR kg kg ⁻¹
C1= (Si) vs. (C)	-0,97 [*]	0,25 ^{ns}	3,53 ^{**}	0,09 ^o	-0,27 ^{ns}
C2= (Si+G) vs. (C+G)	-0,91 [*]	-0,60 ^{ns}	3,14 [*]	0,06 ^{ns}	0,07 ^{ns}
C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C)	0,16 ^{ns}	-0,44 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,28 ^{ns}
C4= (T) vs. (G)	5,43 ^{**}	2,35 ^{**}	6,71 ^{**}	-0,24 ^{**}	-0,10 ^{ns}
C5= (T) vs. (Si)	9,05 ^{**}	3,79 ^{**}	12,54 ^{**}	-0,27 ^{**}	-0,07 ^{ns}
C6= (T) vs. (C)	8,07 ^{**}	4,04 ^{**}	16,07 ^{**}	-0,18 ^{**}	-0,34 ^{ns}

Contraste	Crescimento da Planta de Arroz				
	MPA g	MPR g	AF cm ²	AFEsp m ² kg ⁻¹	PA/PR kg kg ⁻¹
C1= (Si) vs. (C)	-0,34 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,02 [*]	-0,02 ^{ns}
C2= (Si+G) vs. (C+G)	-0,57 [*]	-0,31 ^{ns}	-0,76 [*]	0,02 ^o	0,04 ^{ns}
C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C)	0,45 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,43 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,22 ^{ns}
C4= (T) vs. (G)	0,42 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,81 [*]	0,00 ^{ns}	-0,11 ^{ns}
C5= (T) vs. (Si)	0,90 ^{**}	0,62 [*]	1,23 ^{**}	-0,02 [*]	-0,33 ^{ns}
C6= (T) vs. (C)	0,56 [*]	0,41 ^{ns}	1,06 ^{**}	0,00 ^{ns}	-0,36 ^{ns}

^{ns}, ^{**}, ^{*}, ^o: Não significativo e significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.; MPA = Massa da Parte Aérea; MPR = Massa da Parte Radicular; AF = Área Foliar; AFEsp = Área Foliar Específica; PA/PR = Razão da MPA e MPR.

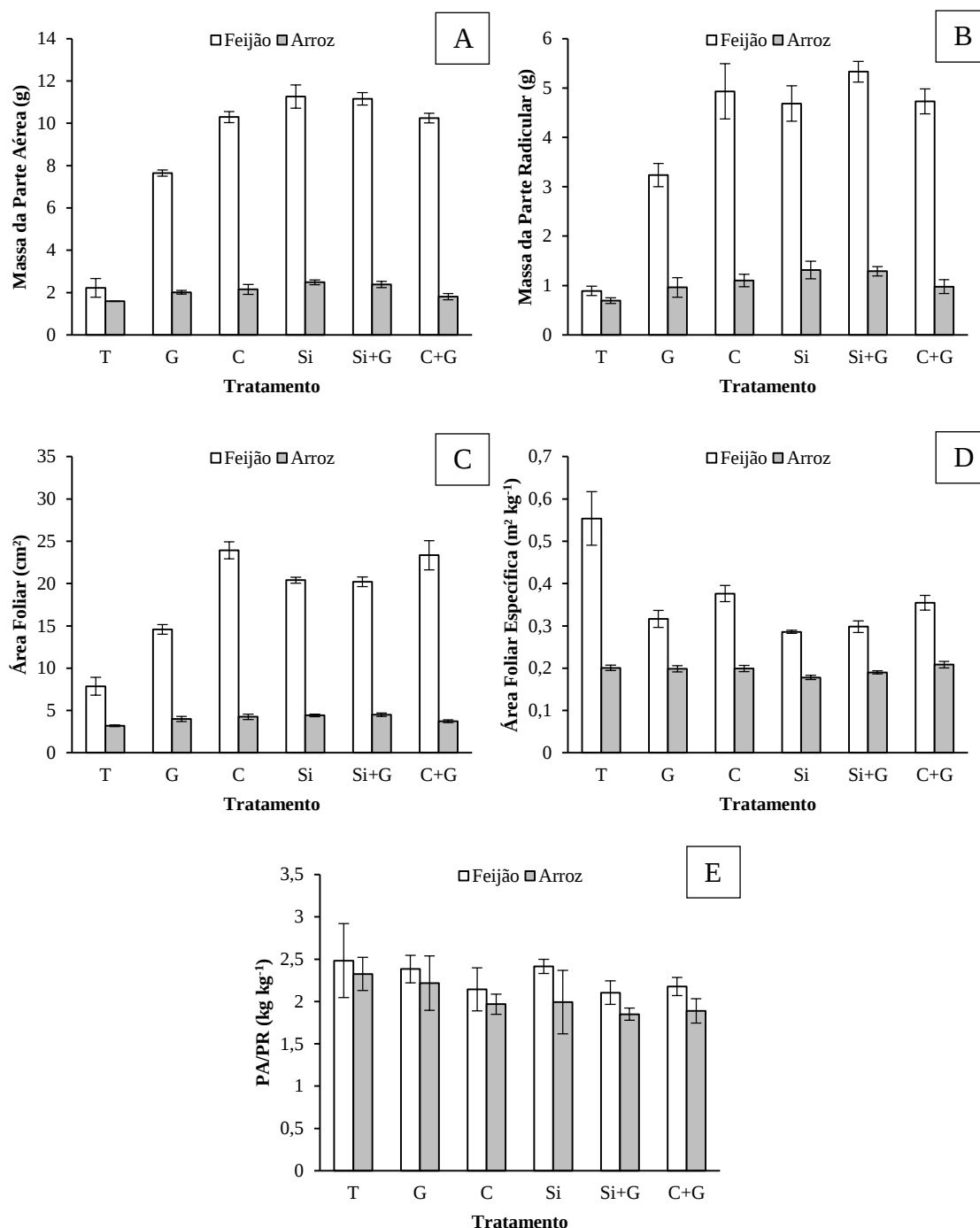


Figura 3.1. Média $\pm$ erro-padrão das variáveis de crescimento das plantas de feijão (barras em branco) e arroz (barras em cinza) submetidas aos diferentes tratamentos: MPA-Massa da parte aérea (A); MPR-Massa da parte radicular (B); AF-Área foliar(C); AFEsp-Área foliar específica (D); e PA/PR-Razão da massa da parte aérea e parte radicular (E).

Houve diferenças no crescimento de raiz em profundidade, principalmente no feijão (Tabela 3.4; Figura 3.2-A e B). O uso do CaCO_3 , em comparação ao CaSiO_3 (C1), aumentou ($p<0,10$) a massa de raízes de feijão nas camadas de 5-10 e 10-15 cm do solo. Mas, quando os corretivos foram associados ao gesso (C2), verificou que o CaSiO_3 aumentou a massa de raízes ($p<0,01$) na camada de 20-30 cm do solo (Tabela 3.4; Figura 3.2-A).

Na cultura do feijão, a associação do gesso com os corretivos (C3) diminuiu ($p<0,01$) (-415 mg) a massa de raízes nos primeiros 5 cm do solo, mas aumentou em 587 mg na camada de 5-10 cm (Tabela 3.4; Figura 3.2-A). O uso isolado do gesso, em comparação à testemunha (C4), proporcionou ganhos significativos de massa de raízes até a profundidade de 35 cm do solo, e o uso isolado de CaSiO_3 (C5) e CaCO_3 (C6) possibilitou ganhos significativos ($p<0,01$) de massa de raízes até a última camada analisada (40 cm de profundidade). Durante a condução do experimento observou-se no fundo do vaso a projeção das raízes que cresceram para fora do recipiente, nos tratamentos que receberam CaCO_3 , CaSiO_3 e CaSO_4 (Tabela 3.4; Figura 3.2-A).

No arroz, o uso isolado de CaSiO_3 aumentou a massa das raízes na camada mais superficial (0-5 cm) em 203 mg, o que é um ganho significativo em comparação aos outros tratamentos. Nas demais profundidades houve tendência de aumento quando se utilizou o CaSiO_3 em comparação à testemunha ou ao CaCO_3 , no entanto essas diferenças não foram significativas (Tabela 3.4; Figura 3.2-B).

Nas Figuras 3.2-C e 3.2-D, observa-se a distribuição proporcional das raízes no perfil do solo nos diferentes tratamentos contendo a planta de feijão e arroz, respectivamente. No feijão, verificou-se que na testemunha, em torno de 75 % das raízes situavam-se nos 5 primeiros cm do solo, sendo que esse valor aumentou para próximo de 85 % ao se considerar os primeiros 10 cm de solo. Na camada de 10-15 cm há apenas 6 % das raízes da planta. Ao adicionar o CaSiO_3 verificou-se melhor distribuição vertical das raízes, com 44 % das raízes ficando na camada de 0-10 e 15 % na camada de 10-15 cm (Figura 3.2-C). No arroz as diferenças foram menos evidentes devido às características dos sistemas radiculares, no feijão é pivotante enquanto que no arroz é fasciculado.

A diferença de distribuição de raízes no perfil do solo é importante quando a planta é submetida a estresses abióticos como falta de água e excesso de ventos. A maior fixação

das raízes ao solo evita o acamamento e a melhor distribuição das raízes permite maior exploração do volume de solo, com maior absorção de água e nutrientes e aumento da capacidade de tolerar o estresse durante períodos de estiagem.

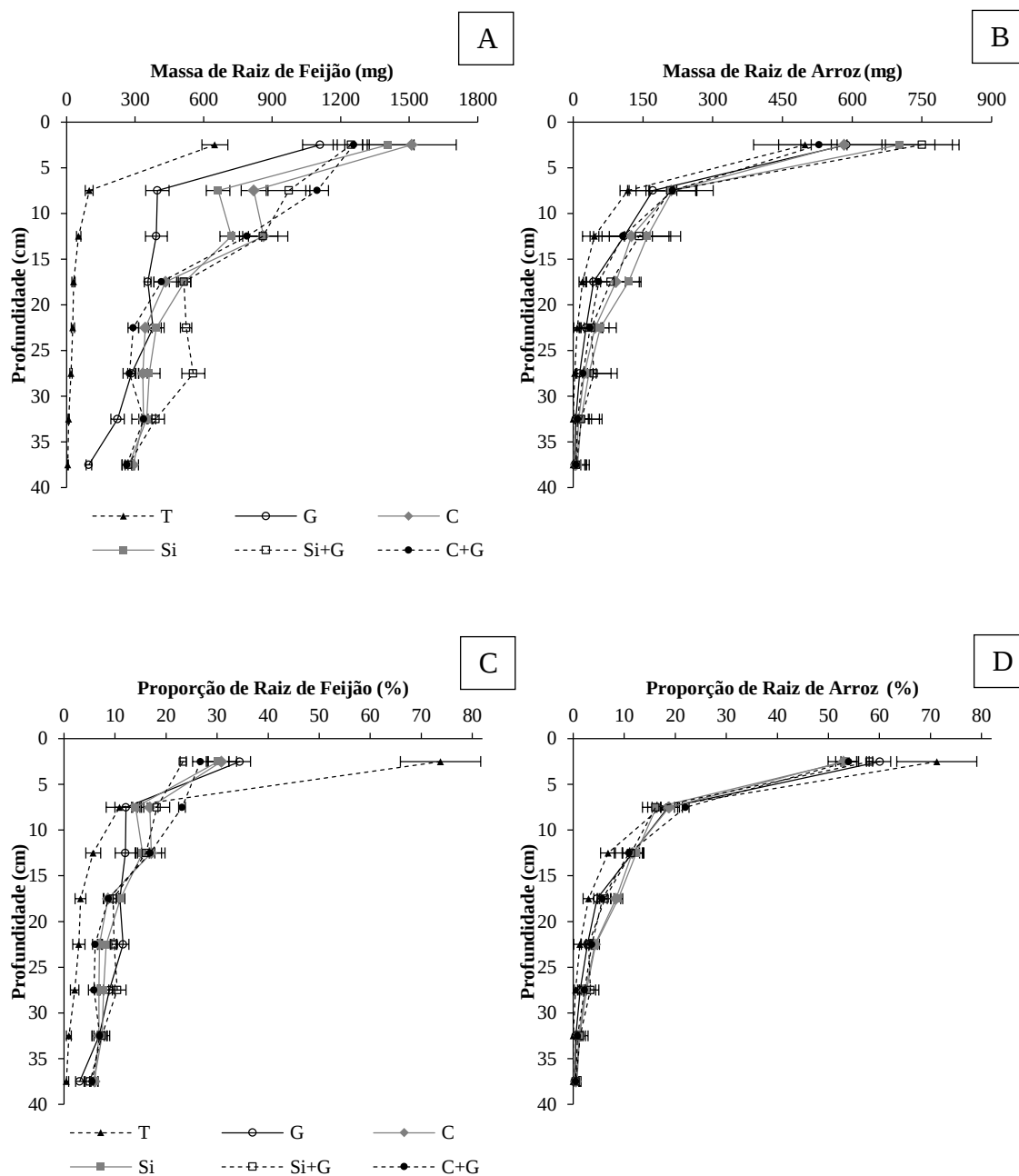


Figura 3.2. Acúmulo de massa (A e B) e distribuição relativa (C e D) das raízes das plantas de feijão (A, C) e arroz (B, D), nas camadas de 0-40 cm do solo, submetidas aos diferentes tratamentos.

Tabela 3.4. Contrastes médios e suas significâncias para o crescimento de raízes (mg) no solo (0-40 cm), cultivado com plantas de feijão e arroz.

Prof.	Contrastes - Raiz Feijão (mg)						Contrastes - Raiz Arroz (mg)					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0-5	102,5 ^{ns}	11,0 ^{ns}	415,6 ^{**}	460,3 ^{**}	759,1 ^{**}	861,6 ^{**}	-119,2 ^{ns}	-221,9 ^{**}	5,9 ^{ns}	89,4 ^{ns}	203,6 [*]	84,4 ^{ns}
05-10	155,7 [°]	123,0 ^{ns}	-587,3 ^{**}	298,0 ^{**}	564,1 ^{**}	719,8 ^{**}	-3,6 ^{ns}	5,2 ^{ns}	1,9 ^{ns}	53,5 ^{ns}	96,4 ^{ns}	92,8 ^{ns}
10-15	141,1 [°]	-70,2 ^{ns}	-66,7 ^{ns}	340,7 ^{**}	669,0 ^{**}	810,1 ^{**}	-34,6 ^{ns}	-34,7 ^{ns}	36,3 ^{ns}	63,8 ^{ns}	114,2 ^{ns}	79,6 ^{ns}
15-20	-82,8 ^{ns}	-97,1 ^{ns}	19,2 ^{ns}	324,8 ^{**}	485,2 ^{**}	402,4 ^{**}	-27,1 ^{ns}	-25,9 ^{ns}	74,7 ^{ns}	24,0 ^{ns}	99,0 ^{ns}	71,9 ^{ns}
20-25	-48,0 ^{ns}	-230,8 ^{**}	-78,3 ^{ns}	351,8 ^{**}	365,2 ^{**}	317,3 ^{**}	-11,2 ^{ns}	-2,8 ^{ns}	30,2 ^{ns}	18,9 ^{ns}	49,4 ^{ns}	38,2 ^{ns}
25-30	-27,9 ^{ns}	-279,4 ^{**}	-133,2 ^{ns}	264,6 ^{**}	342,7 ^{**}	314,8 ^{**}	-9,8 ^{ns}	-23,0 ^{ns}	-7,4 ^{ns}	11,0 ^{ns}	30,9 ^{ns}	21,1 ^{ns}
30-35	-14,4 ^{ns}	-52,1 ^{ns}	-40,0 ^{ns}	214,3 [*]	342,0 ^{**}	327,6 ^{**}	-5,2 ^{ns}	-8,5 ^{ns}	2,0 ^{ns}	5,4 ^{ns}	17,0 ^{ns}	11,8 ^{ns}
35-40	19,7 ^{ns}	-5,7 ^{ns}	29,9 ^{ns}	92,2 ^{ns}	267,1 ^{**}	286,8 ^{**}	-3,0 ^{ns}	-0,5 ^{ns}	2,8 ^{ns}	3,9 ^{ns}	9,3 ^{ns}	6,3 ^{ns}

^{ns}, **, *, °: Não significativo e significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

C1= (Si) vs. (C); C2= (Si+G) vs. (C+G); C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C); C4= (T) vs. (G); C5= (T) vs. (Si); C6= (T) vs. (C).

Teor e Conteúdo Foliar de Elementos Químicos nas Plantas de Arroz e Feijão

Nas Tabelas 3.5 e 3.6 estão os contrastes médios para o teor e conteúdo, respectivamente, dos elementos no tecido foliar das plantas de feijão e arroz. Os elementos avaliados foram o Si, Al, N, Ca, Fe, Mn, Mg e K. As médias $\pm$ erro-padrão do teor e conteúdo dos elementos nas folhas de feijão e arroz estão ilustrados nas Figuras 3.3, 3.4, e 3.5.

Silício (Si)

O teor e o conteúdo de Si na folha aumentaram ($p < 0,01$) ao se aplicar o CaSiO_3 em comparação ao CaCO_3 , com ou sem adição de gesso (C1 e C2), tanto na espécie acumuladora de Si (arroz) quanto na não acumuladora (feijão). O teor de Si na folha de arroz ($23,0 \pm 0,74 \text{ g kg}^{-1}$) foi significativamente superior ao da folha de feijão ($7,8 \pm 0,37 \text{ g kg}^{-1}$), quando se aplicou o CaSiO_3 (Figura 3.3-A). No entanto, nesse mesmo tratamento, não foi observada diferença ao se comparar o conteúdo de Si nas culturas, no arroz o conteúdo foi $57,1 \pm 2,25 \text{ mg}$ e no feijão $55,3 \pm 0,92 \text{ mg}$ (Figura 3.3-B).

O feijoeiro é relatado como uma planta não acumuladora de Si pelo fato de seu teor na parte aérea ser menor que 10 g kg^{-1} , não havendo relatos na literatura de que possua enzimas específicas para a absorção de Si, como ocorre no arroz (Ma et al., 2001; Ma et al., 2006). No entanto, quando a disponibilidade de silício solúvel (H_4SiO_4) no solo é alta, há absorção expressiva desse composto por diferentes espécies, uma vez que é absorvido juntamente com a água pelo fluxo transpiracional da planta. Por esse motivo, o conteúdo de Si não diferiu entre as plantas de arroz e feijão quando a disponibilidade de H_4SiO_4 no solo foi aumentada pela aplicação do CaSiO_3 .

O uso do CaSO_4 (C4) e do CaCO_3 (C6), em comparação à testemunha, diminuiu ($p < 0,01$) o teor de Si na folha de feijão, provavelmente devido ao efeito de concentração do Si na testemunha, uma vez que a planta produziu menor biomassa (Figura 3.1-A). Já o conteúdo aumentou em 10 mg quando utilizou o gesso (C4) e $7,3 \text{ mg}$ ao utilizar o CaCO_3 (C6), valores significativamente inferiores ao ganho de $46,19 \text{ mg}$ de Si no tratamento com CaSiO_3 (C5), em comparação à testemunha (Tabela 3.6).

No arroz, a aplicação de CaSiO_3 ($+12,33 \text{ g kg}^{-1}$ de Si; C5) e CaCO_3 ($+3,76 \text{ g kg}^{-1}$ de Si; C6) aumentou ($p < 0,01$) o teor de Si na folha, em comparação à testemunha, ao contrário do gesso que não alterou o teor de Si ($p \geq 0,10$). O conteúdo de Si também foi aumentado, em comparação à testemunha, nos tratamentos contendo CaSiO_3 ($+40,14 \text{ mg}$; C5) e CaCO_3 ($+13,99 \text{ mg}$, C6).

Comparando-se os resultados do teor e conteúdo de Si entre as duas culturas (Figura 3.3 – A e B), conclui-se que a espécie acumuladora de Si (arroz) possui maior capacidade de extração do Si no solo em condições onde há baixa disponibilidade desse elemento, em comparação à espécie não acumuladora (feijão). No entanto, quando a disponibilidade de H_4SiO_4 na solução solo é alta, as duas espécies têm capacidades semelhantes em extrair esse elemento químico.

Tabela 3.5. Contrastes médios e suas significâncias para os teores médios de elementos na folha da planta de feijão e arroz.

Contraste	Teor de Elementos na Folha de Feijão							
	Si g kg ⁻¹	Al mg kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Mg g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹
C1= (Si) vs. (C)	-5,19 **	-1,55 ^{ns}	17,85 **	1,19 **	36,34 ^{ns}	-16,14 ^{ns}	0,42 ^{ns}	3,82 ^{ns}
C2= (Si+G) vs. (C+G)	-5,40 **	11,68 ^{ns}	16,46 **	0,08 ^{ns}	28,81 ^{ns}	-21,43 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-0,53 ^{ns}
C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C)	0,30 ^{ns}	-19,98 ^{ns}	-8,81 ^{ns}	-1,03 **	-20,82 ^{ns}	-50,37 ^{ns}	-1,12 ^{ns}	-1,34 ^{ns}
C4= (T) vs. (G)	-2,31 **	17,60 ^{ns}	-18,96 **	0,72 **	-58,92 *	-103,59°	-1,23°	-1,40 ^{ns}
C5= (T) vs. (Si)	1,28 ^{ns}	-25,29 ^{ns}	-22,45 **	3,34 **	-61,13 *	-194,95 **	-3,97 **	-6,79 *
C6= (T) vs. (C)	-3,91 **	-26,85 ^{ns}	-4,60 ^{ns}	4,53 **	-24,79 ^{ns}	-211,08 **	-3,56 **	-2,97 ^{ns}

Contraste	Teor de Elementos na Folha de Arroz							
	Si g kg ⁻¹	Al mg kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Mg g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹
C1= (Si) vs. (C)	-8,57 **	5,52 ^{ns}	4,54 ^{ns}	0,38 ^{ns}	11,03 ^{ns}	252,51 **	1,80 *	-0,17 ^{ns}
C2= (Si+G) vs. (C+G)	-11,17 **	-0,89 ^{ns}	-0,93 ^{ns}	0,27 ^{ns}	-7,74 ^{ns}	201,69 **	1,60 *	1,86 ^{ns}
C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C)	2,73 *	-15,23 ^{ns}	8,88 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-2,01 ^{ns}	-28,72 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-1,76 ^{ns}
C4= (T) vs. (G)	0,14 ^{ns}	-171,68 **	1,59 ^{ns}	0,12 ^{ns}	37,72 ^{ns}	23,86 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,48 ^{ns}
C5= (T) vs. (Si)	12,33 **	-285,20 **	-3,01 ^{ns}	0,38 ^{ns}	-43,38°	-146,81 **	-1,11 ^{ns}	-0,63 ^{ns}
C6= (T) vs. (C)	3,76 **	-279,68 **	1,53 ^{ns}	0,76 **	-32,35 ^{ns}	105,71°	0,70 ^{ns}	-0,81 ^{ns}

^{ns}, **, *, °: Não significativo e significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 3.6. Contrastes médios e suas significâncias para os conteúdos médios de elementos na folha da planta de feijão e arroz.

Contraste	Conteúdo de Elementos na Folha de Feijão							
	Si mg	Al µg	N mg	Ca mg	Fe µg	Mn µg	Mg mg	K mg
C1= (Si) vs. (C)	-38,89**	-79,08 ^{ns}	100,54**	4,59**	165,79*	-216,19 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	9,76 ^{ns}
C2= (Si+G) vs. (C+G)	-37,37**	60,84 ^{ns}	105,61**	-0,54 ^{ns}	172,75*	-178,15 ^{ns}	0,20 ^{ns}	-8,37 ^{ns}
C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C)	4,01 ^{ns}	-121,93 ^{ns}	-60,11°	-6,74**	-136,09 ^{ns}	-311,33 ^{ns}	-7,22*	-7,87 ^{ns}
C4= (T) vs. (G)	10,12**	438,76**	33,63 ^{ns}	4,69**	180,95*	620,04**	18,55**	75,56**
C5= (T) vs. (Si)	46,19**	459,96**	58,40*	26,23**	380,16**	565,72**	14,53**	97,52**
C6= (T) vs. (C)	7,30°	380,87**	158,94**	30,82**	545,95**	349,53*	14,47**	107,28**

Contraste	Conteúdo de Elementos na Folha de Arroz							
	Si mg	Al µg	N mg	Ca mg	Fe µg	Mn µg	Mg mg	K mg
C1= (Si) vs. (C)	-26,15**	-4,67 ^{ns}	-2,70 ^{ns}	0,54 ^{ns}	-18,27 ^{ns}	344,94°	2,76 ^{ns}	-10,29 ^{ns}
C2= (Si+G) vs. (C+G)	-33,49**	-40,52 ^{ns}	-23,67 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-77,90 ^{ns}	30,98 ^{ns}	1,11 ^{ns}	-11,24 ^{ns}
C3= (Si+G) + (C+G) vs. (Si) + (C)	12,11*	3,54 ^{ns}	35,95 ^{ns}	0,20 ^{ns}	52,42 ^{ns}	244,75 ^{ns}	2,23 ^{ns}	6,49 ^{ns}
C4= (T) vs. (G)	4,77 ^{ns}	-200,14*	20,84 ^{ns}	0,39 ^{ns}	139,88°	342,74°	2,19 ^{ns}	11,29 ^{ns}
C5= (T) vs. (Si)	40,14**	-398,75**	29,83 ^{ns}	1,28 ^{ns}	36,35 ^{ns}	266,43 ^{ns}	1,00 ^{ns}	21,19*
C6= (T) vs. (C)	13,99**	-403,42**	27,13 ^{ns}	1,82 ^{ns}	18,08 ^{ns}	611,37**	3,75°	10,91 ^{ns}

^{ns}, **, *, °: Não significativo e significativo a 1%, 5%, e a 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

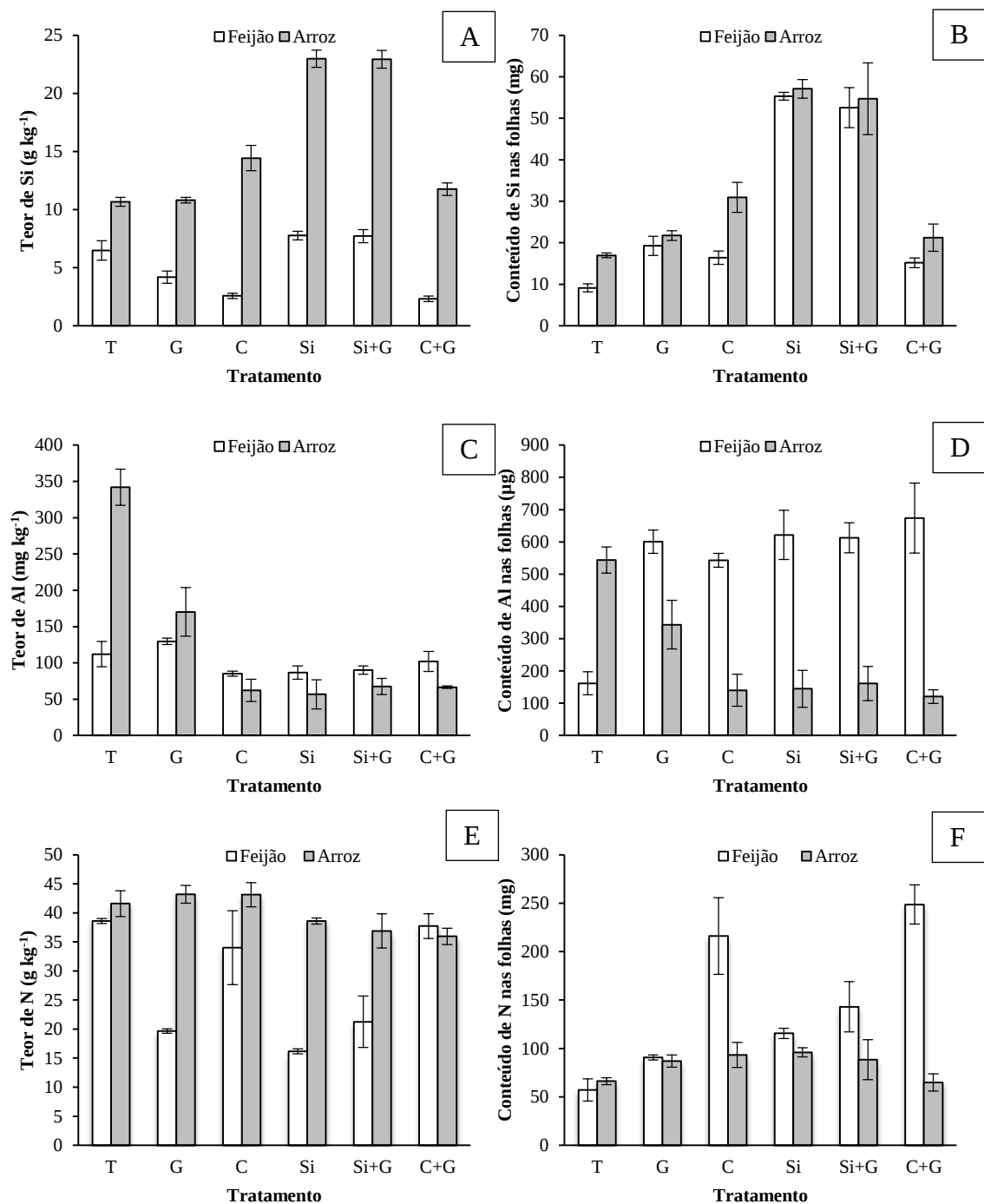


Figura 3.3. Teores (A, C e E) e conteúdos (B, D, e F) de Si, Al e N, respectivamente, em folhas das plantas de arroz (barras em cinza) e feijão (barras em branco) submetidas aos diferentes tratamentos.

Alumínio (Al)

De acordo com a Tabela 3.5 e Figura 3.3-C, o teor de Al na folha de feijão tendeu a diminuir ao se aplicar CaCO_3 e CaSiO_3 (C5 e C6), mas essa diminuição não foi significativa ($p \geq 0,10$), assim como para os demais contrastes. No entanto, o conteúdo (Tabela 3.6) aumentou significativamente ($p < 0,01$) ao se aplicar CaSO_4 (+438,76 μg ; C4), CaSiO_3 (+459,96 μg ; C5) e CaCO_3 (+380,87 μg ; C6), em comparação à testemunha, certamente pelo menor crescimento de massa da parte aérea na testemunha em comparação aos outros tratamentos (Figura 3.1-A). O CaSiO_3 e CaCO_3 proporcionaram o mesmo ($p \geq 0,10$) conteúdo de Al na folha de feijão (C1 e C2).

Na folha de arroz, houve diminuição ($p < 0,01$) expressiva no teor e conteúdo de Al ao se aplicar o CaSO_4 (C4), CaSiO_3 (C5) e CaCO_3 (C6), sendo que a diminuição no teor chegou a ser de 285 mg kg^{-1} ao se aplicar o CaSiO_3 em comparação à testemunha (C5, Tabela 3.5) e a diminuição no conteúdo em torno de 400 μg ao se aplicar CaSiO_3 e CaCO_3 (C5 e C6, Tabela 3.6).

Observando-se os dados apresentados na Figura 3.3 de A-D, verifica-se um antagonismo entre os teores de Si e de Al, principalmente na folha de arroz, sendo que com maior teor de Si houve menor teor de Al. Tal resultado corrobora com trabalhos de Reis (2000) e Reis et al. (2013), que observaram retenção de Al em sílica em plantas de arroz e feijão e concluíram que grande parte do Al absorvido é retido pela sílica presente no interior da planta.

O provável mecanismo que possibilita a diminuição da toxidez do Al na planta é a precipitação do Al^{3+} com o Si no apoplasto das células radiculares formando principalmente aluminossilicatos, com diminuição da atividade do Al no interior da planta (Epstein, 2001). Tal capacidade de associação Si-Al é de fundamental importância para a planta por torná-la mais tolerante a solos com altos teores de Al.

Nitrogênio (N)

O uso do CaCO_3 proporcionou maior aumento ($p < 0,01$) do teor (Tabela 3.5) e do conteúdo (Tabela 3.6) de N na folha de feijão do que o CaSiO_3 , com ou sem adição do gesso (C1 e C2). Isso não foi observado para o arroz, uma vez que nenhum dos contrastes avaliados foi significativo ($p \geq 0,10$), não havendo alterações significativas no teor nem no conteúdo de N na folha do arroz nos tratamentos avaliados.

O uso do CaSO_4 e CaSiO_3 diminuiu os teores de N na folha de feijão (C4 e C5; Figura 3.3-E), enquanto que com o CaCO_3 não houve alteração ($p \geq 0,10$). Para o conteúdo de N nas folhas de feijão, não houve alteração ao se aplicar CaSO_4 (C4), mas houve aumento ($p < 0,01$) ao se aplicar CaSiO_3 (C5) e CaCO_3 (C6) (Figura 3.3-F). No entanto, mesmo com menores teores de N na folha não houve comprometimento no acúmulo de massa do feijoeiro (Tabela 3.3; Figura 3.1-A e B), o que sugere maior eficiência da planta na utilização do N. Deus & Büll (2013), avaliaram a eficiência de diferentes escórias contendo silício no cultivo de feijão e verificaram que o calcário dolomítico calcinado proporcionou maior teor de N na folha (42 g kg^{-1}) que a escória de alto forno (38 g kg^{-1}) (para teores de Si 4,2 e 6,4 g kg^{-1} , respectivamente), entretanto, a produtividade foi estatisticamente igual ($2,10 \text{ t ha}^{-1}$).

Foi observado, durante a desmontagem do experimento, que havia grande presença de nódulos ativos nas raízes do feijoeiro. Esses nódulos estão relacionados à simbiose entre as plantas de feijão e bactérias fixadoras de nitrogênio, nativas do solo.

Não foram medidos a biomassa nem o número de nódulos, mas visualmente as plantas tratadas com CaSiO_3 aparentavam possuir maiores números e tamanhos de nódulos. Epstein (2001) cita que a aplicação de Si no solo favoreceria a nodulação em espécies leguminosas.

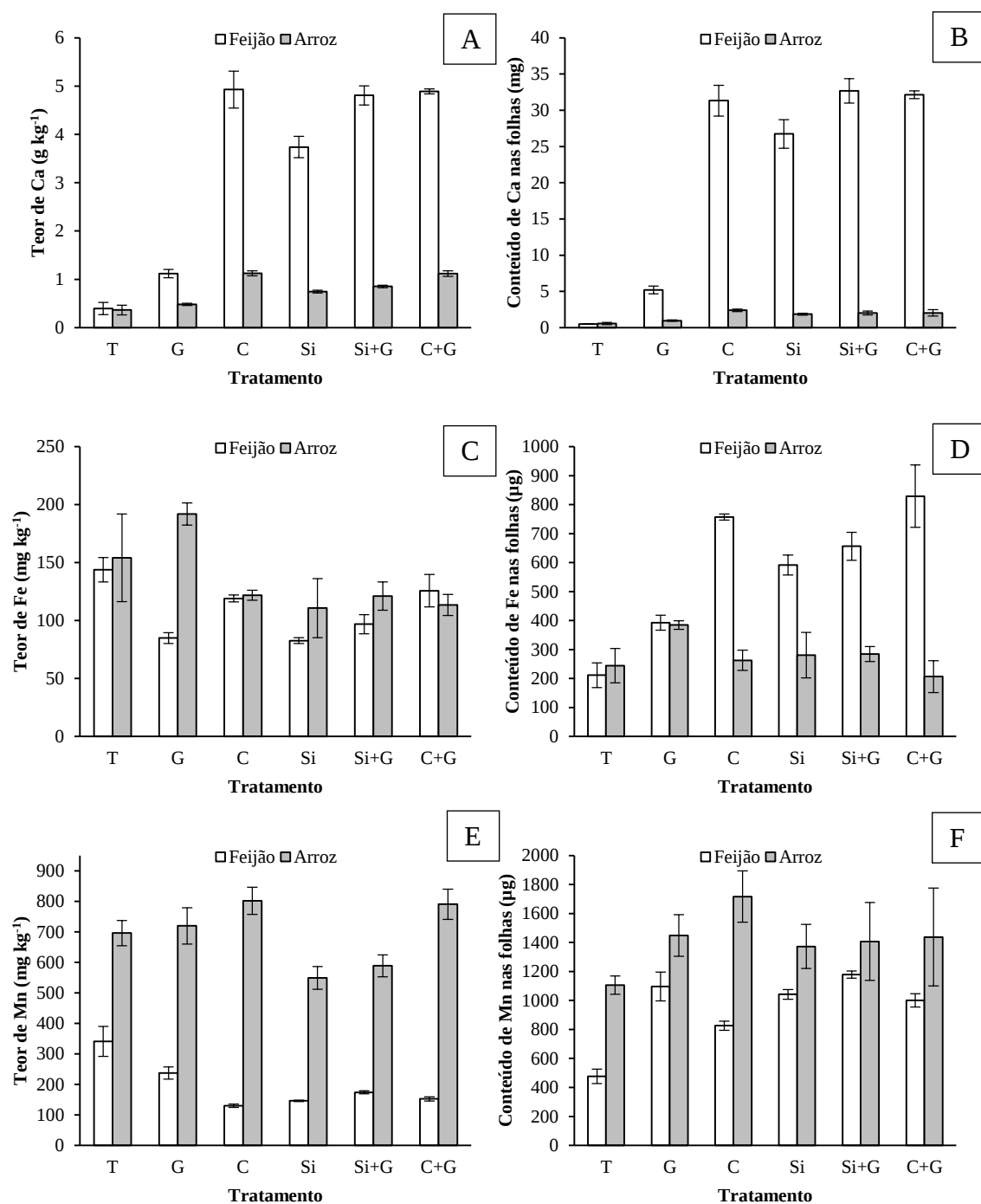


Figura 3.4. Teores (A, C e E) e conteúdos (B, D, e F) de Ca, Fe e Mn, respectivamente, em folhas das plantas de feijão (barras em branco) e arroz (barras em cinza) submetidas aos diferentes tratamentos.

Cálcio (Ca)

Houve aumento ($p < 0,01$) do teor e do conteúdo de cálcio na folha do feijão quando se utilizou o CaCO_3 em comparação ao CaSiO_3 (C1), no entanto, quando os corretivos foram associados ao gesso (C2), não houve diferença ($p \geq 0,10$) no teor e no conteúdo (Tabela 3.5 e 3.6; Figura 3.4-A e B).

A mistura de gesso com os corretivos aumentou o teor e o conteúdo de Ca na folha de feijão (C3). Uma vez que o Ca contido no CaSO_4 aumentou o Ca disponível do solo para as plantas (Tabela 3.5 e 3.6; Figura 3.4-A e B).

O uso isolado de CaSO_4 (C4), CaSiO_3 (C5) e CaCO_3 (C6), aumentaram o teor e conteúdo de Ca na folha de feijão.

Quanto ao teor de Ca no arroz, apenas o C6 foi significativo na planta de arroz, isto é, apenas o CaCO_3 (Figura 3.4-A) aumentou o teor de Ca no arroz. O conteúdo tendeu a ser maior nos tratamentos com CaSiO_3 (C5) e CaCO_3 (C6), mas tal aumento não foi significativo ($p \geq 0,10$).

As diferenças marcantes observadas entre as duas culturas refletem a distinta exigência que cada uma tem para Ca. As leguminosas em geral são plantas mais exigentes em Ca que as gramíneas, por isso as plantas de feijão responderam mais aos tratamentos quanto à alteração no teor e conteúdo foliar de Ca.

Ferro (Fe)

Verifica-se que o teor de ferro na folha de feijão tendeu a ser menor quando se aplicou o CaSiO_3 , em relação ao CaCO_3 , no entanto, essa diferença não foi significativa (C1, C2) (Tabela 3.5 e Figura 3.4-C), mas quanto ao conteúdo verificou-se redução significativa ($-165,79 \mu\text{g}$) ao se aplicar o CaSiO_3 em comparação ao CaCO_3 (Tabela 3.6 e Figura 3.4-D)

As aplicações do CaSO_4 (C4) e do CaSiO_3 (C5) diminuíram significativamente ($p < 0,05$) o teor de Fe na folha de feijão em relação à testemunha, enquanto o conteúdo aumentou em $180 \mu\text{g}$ com CaSO_4 e $380 \mu\text{g}$ com CaSiO_3 . Já o CaCO_3 não alterou o teor de Fe na folha, mas o seu conteúdo aumentou em $546 \mu\text{g}$ ($p < 0,01$).

Mas, ao contrário do esperado, o teor de Fe na folha de feijão e arroz não diminuiu ao se aplicar o CaCO_3 , em comparação à testemunha (C6), uma vez que em pH maiores o Fe se precipita na forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, diminuindo a disponibilidade para as plantas.

Na folha de arroz apenas a aplicação do CaSiO_3 (C5) diminuiu ($p < 0,10$) o teor de Fe, já o CaSO_4 tendeu a aumentar, ao contrário do ocorrido no feijão (Tabela 3.5). Quanto

ao conteúdo, apenas o CaSO_4 favoreceu o aumento ($p < 0,10$) de Fe na folha de arroz (+140 μg) (Tabela 3.6).

O fato de apenas o CaSiO_3 ter diminuído significativamente o teor de Fe nas folhas de arroz e feijão indica que algo, além do pH, diminuiu a disponibilidade de Fe para as plantas. Talvez a associação do Fe com formas de Si polimerizados formado no solo e no interior da planta ao se aplicar o CaSiO_3 , semelhante que ocorre com o Al, tenha proporcionado tal resultado.

Manganês (Mn)

O teor e o conteúdo de Mn na folha de feijão não diferiu ($p \geq 0,10$) ao se utilizar o CaCO_3 em comparação ao CaSiO_3 , combinado ou não ao gesso (C1, C2 e C3) (Tabela 3.5 e 3.6), mas em comparação à testemunha o CaSO_4 (C4) reduziu ($p < 0,10$) o teor de Mn, assim como o CaSiO_3 (C5) e CaCO_3 (C6) (Tabela 3.5; Figura 3.4-E). Quanto ao conteúdo, em comparação à testemunha, verificou aumento de 620 μg de Mn ao aplicar o CaSO_4 (C4), 566 μg ao aplicar o CaSiO_3 (C5) e 350 μg ao aplicar o CaCO_3 (C6) (Tabela 3.6)

No arroz, verificaram-se maiores teores de Mn (Figura 3.4-E) em comparação ao feijão. E, diferente ao ocorrido no feijão, o uso de CaSiO_3 em comparação ao CaCO_3 (C1) reduziu o teor e conteúdo de Mn em 252 mg kg^{-1} e 345 μg , respectivamente, na folha de arroz (Tabela 3.5 e 3.6).

O uso de gesso, em comparação à testemunha (C4), não alterou o teor de Mn, mas aumentou ($p < 0,10$) seu conteúdo na folha de arroz (Tabela 3.5 e 3.6). O teor de Mn no tratamento contendo o CaSiO_3 (C5) reduziu em 147 mg kg^{-1} e o conteúdo não alterou significativamente. Já o CaCO_3 , em comparação à testemunha (C6), aumentou ($p < 0,10$) em 106 mg kg^{-1} o teor e em 611 μg o conteúdo de Mn na folha de arroz (Figura 3.4-E e F).

O Mn, assim como o Al e Fe, possui interação com as formas poliméricas de Si (sílica) no solo e na planta, por ser cátion metálico, ficando adsorvido nas cargas de superfícies da sílica. Esse conhecimento é de fundamental importância agrícola. Pois em regiões onde há problemas devido à alta disponibilidade de Mn^{2+} no solo, o uso de CaCO_3 não é eficiente para precipitar todo Mn devido ao efeito do aumento pH. Com o uso do CaSiO_3 além do efeito do pH, que é pouco expressivo sobre o Mn^{2+} na faixa ideal de pH para cultivo agrícola, haverá o efeito do Si, adsorvendo e precipitando o Mn no solo e no interior da planta, devido a característica do polímero de Si formado.

De acordo com Zanão Júnior et al. (2010) a aplicação de Si em arroz cultivado em solução nutritiva, além de diminuir o teor de Mn nas folhas, aumentou o teor nas raízes e proporcionou maior homogeneidade de distribuição do Mn pelas partes da planta. Esses mesmos autores encontraram que teor de Mn na folha do arroz, que recebeu dose 0 mmol L⁻¹ de Si e 2,5 µmol L⁻¹ de Mn, foi de 723 mg kg⁻¹ e caiu para 568 mg kg⁻¹ (-21,44 %) quando foram adicionados 2 mmol L⁻¹ de Si e 2,5 µmol L⁻¹ de Mn. Esses valores foram bem próximos ao encontrado nesta pesquisa, uma vez que na testemunha o teor de Mn na folha de arroz foi de 696 mg kg⁻¹ e caiu para 549mg kg⁻¹ (-21,12 %) (Figura 3.4-E).

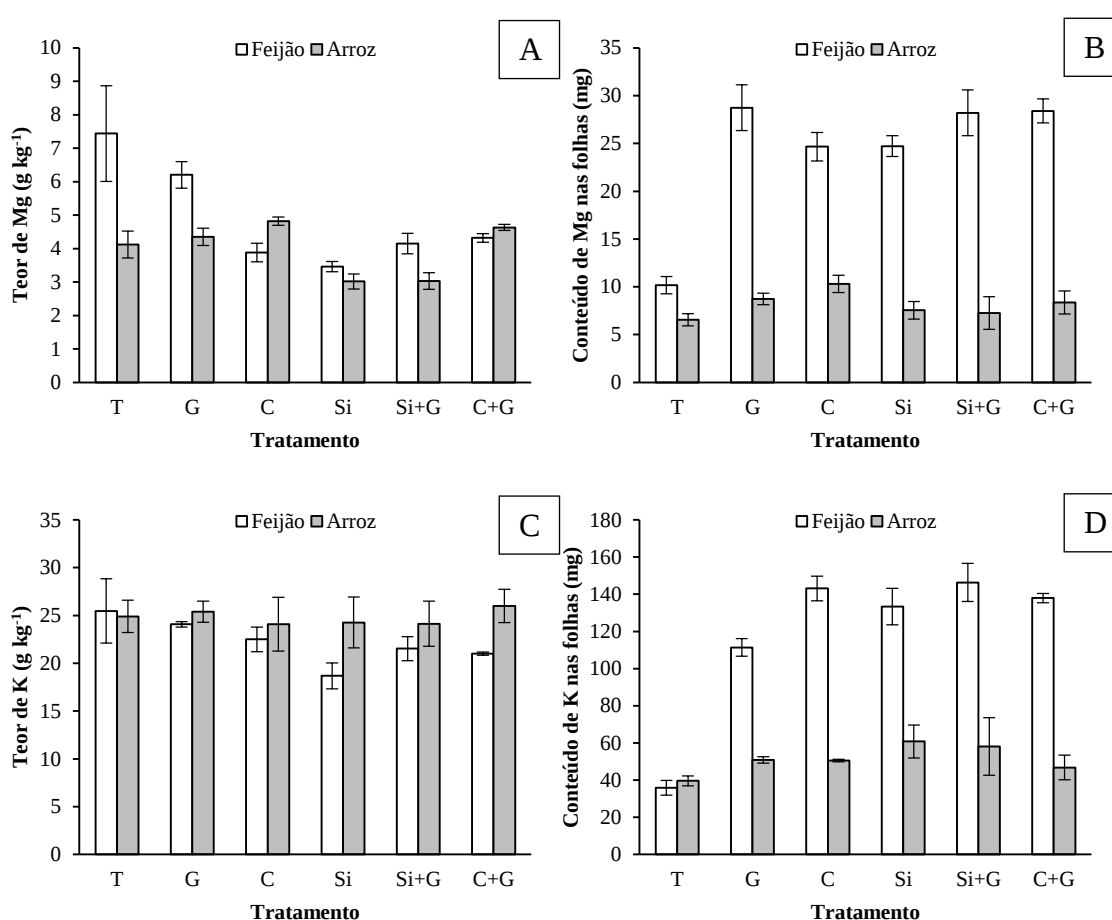


Figura 3.5. Teores (A e C) e conteúdos (B e D) de Mg e K, respectivamente, em folhas das plantas de feijão (barras em branco) e arroz (barras em cinza) submetidas aos diferentes tratamentos

Magnésio (Mg) e Potássio (K)

O teor e conteúdo de Mg não alteraram ($p \geq 0,10$) ao se comparar o uso do CaCO_3 com o CaSiO_3 (C1 e C2), no entanto houve diminuição do teor e aumento do conteúdo quando se utilizou isoladamente o CaSO_4 , CaSiO_3 e CaCO_3 (C4, C5, C6) (Tabela 3.5 e 3.6). A diminuição do teor de Mg nos tratamentos com os corretivos parece estar diretamente ligado ao efeito de concentração (na testemunha) e diluição (com corretivo) desse elemento na planta devido a grande diferença de acúmulo de biomassa (Figura 3.1-A) ao comparar à testemunha. Nesse caso, a análise do conteúdo é mais adequada.

No arroz, o CaCO_3 aumentou o teor de Mg em comparação ao CaSiO_3 (C1 e C2) e não houve alteração no seu teor quando se utilizou isoladamente o CaSO_4 , CaSiO_3 e CaCO_3 (C4, C5, C6) (Tabela 3.5; Figura 3.5-A). O conteúdo de Mg na folha do arroz foi maior apenas quando comparou-se o CaCO_3 com a testemunha (C6) ($p < 0,10$). Em geral, o conteúdo de Mg no arroz não sofreu alterações significativas, para os diferentes tratamentos avaliados (Figura 3.5-B).

Quanto ao K, houve pouca alteração no seu teor nos diferentes tratamentos avaliados (Figura 3.5-C), tanto para o feijão quanto para o arroz. Verificou-se a diminuição ($p < 0,05$) do teor de K na folha de feijão ao se comparar o uso isolado do CaSiO_3 à testemunha (C5), não havendo diferenças significativas nos demais contrastes testados.

O conteúdo de K na folha de feijão foi significativamente maior ($p < 0,01$) quando se utilizou isoladamente o CaSO_4 , CaSiO_3 e CaCO_3 , em comparação à testemunha (C4, C5, C6) (Tabela 3.5). No arroz, apenas a adição do CaSiO_3 , em comparação à testemunha (C5), aumentou (+21 mg) o conteúdo de K na folha.

CONCLUSÕES

1. A correção do solo com CaSiO_3 possui vantagens quando se compara com o CaCO_3 por proporcionar maior crescimento da massa da parte aérea e melhorar a distribuição das raízes no solo, para as plantas de feijão e arroz.
2. A associação do gesso com os corretivos de acidez, principalmente o CaSiO_3 , favorece o maior crescimento das raízes de feijão em profundidade
3. Mesmo não sendo uma planta acumuladora de Si, com alta disponibilidade de H_4SiO_4 no solo, o feijão acumula conteúdo semelhante ao arroz.
4. Os elementos metálicos Al, Fe e Mn são fortemente influenciados pelo H_4SiO_4 no solo e na planta, havendo diminuição do teor e conteúdo nos tecidos vegetais, principalmente na espécie acumuladora de Si.

LITERATURA CITADA

- ARNON, D. I. & STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant physiol*, Washington, 14: 371-375, 1939.
- BRASIL, 2004. Ministério da Agricultura - Decreto No. 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura.
- CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FERNANDES, L.A. & OLIVEIRA JUNIOR, A.C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. *R. Bras. Ci. Solo*, 24, 1: 69-74, 2000.
- COSTA, L. M.; MOREAU, A. M. S. S. & MOREAU, M. S. Estabilidade da sílica biogênica extraída de capim jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) em solução de NaOH. *Quím. N.*, 33, 8: 1658-1663, 2010
- DEUS, A. C. F & BÜLL, L. T., Eficiência de escórias de siderurgia na cultura do feijoeiro em sistema de semeadura direta. *Ci. Rur.*, Santa Maria, 43, 10:1783-1789, 2013.
- EPSTEIN E. The anomaly of silicon in plant biology. *PNAS*, 91:11–17, 1994.
- EPSTEIN, E. Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50:641-64, 1999.
- EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs. concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). *Silicon in agriculture*. Amsterdam: Elsevier Science Publishing. 1-16, 2001.
- FIGUEIREDO, E. S.; SANTOS, M. E. dos & GARCIA, A. Modelos de determinação não destrutivo da área foliar do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.). *Nucleus*, 9, 1: 79-84, 2012.
- GUNTZER, F; KELLER, C & MEUNIER, J-D. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 32:201–213, 2012.
- MA, J. F.; MIYAKE, Y. & TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). *Silicon in agriculture*. Amsterdam: Elsevier Science Publishing, 17-39, 2001.

MA, J.F.; TAMAI, K.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; KONISHI, S.; KATSUHARA, M.; ISHIGURO, M.; MURATA, Y. & YANO, M. A silicon transporter in rice. *Nature* 440: 688–691, 2006.

MATICHENKOV, V.V. & BOCHARNIKOVA, E.A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H. eds. *Silicon in agriculture*. Amsterdam, Elsevier. (Studies in Plant Science, 8), 209-219, 2001.

MORTELE, D. F.; Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), UFSM, Santa Maria-RS, 2011.

REIS, W. J. P.; ALVES, E. E. N.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M. & REIS, F. P. Retenção de Al e Mn em tecidos vegetais de plantas de arroz e feijão cultivadas em presença ou não de silicato combinadas com doses de Zn. In: II Simpósio Mineiro de Ciência do Solo, 2013, Anais. Viçosa-MG, UFV, CD-ROM, 2013.

REIS, W.J.P. Retenção de cátions pela sílica em raízes e parte aérea de plantas de feijão e de arroz. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), UFV, Viçosa-MG. 2000.

SACHS J. Ergebnisse einiger neuerer Untersuchungen über die in P flenzen enthaltene Kieselsäure. *Flora* 4:53–55, 1862

SILVA, F.C. (ed.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 627 p., 2009.

TAIZ, L. & ZEIGER, E. *Plant Physiology*. 3^a ed. Sinauer Associates Inc. Sunderland, MA, USA, 690p., 2002.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; FONTES, R. L. F.; NEVES, J. C. L.; KORNDÖRFER, G. H. & ÁVILA, V. T.; Rice grown in nutrient solution with doses of manganese and silicon. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1629-1639, 2010.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O CaSiO_3 pode ser utilizado como substituto eficiente do CaCO_3 para a correção da acidez do solo, desde que sejam adicionadas quantidades equivalentes (em mol_e). Para tanto, deve-se levar em conta o poder neutralizante (PN) do CaSiO_3 , o qual não é um valor fixo, como ocorre para o CaCO_3 (100 %). O PN do CaSiO_3 diminui à medida que o pH do solo aumenta, devido as reações de polimerização do H_4SiO_4 . Para o CaSiO_3 puro estima-se que o PN seja de 64,5 % para atingir valores de pH até 5,5.

CaSiO_3 e CaCO_3 apresentaram eficiências semelhantes quanto a correção do solo em profundidade, sendo que ambos corrigiram o pH apenas 5 cm abaixo da camada de incorporação. Já, a mobilidade de Ca^{2+} foi maior ao se utilizar o CaCO_3 e a de Mg^{2+} foi maior ao utilizar o CaSiO_3 . O H_4SiO_4 apresentou baixa mobilidade no solo, durante o período avaliado, possivelmente devido a afinidade pela fase sólida do solo, adsorvendo e polimerizando-se na camada de incorporação do CaSiO_3 .

O CaSiO_3 propiciou maior crescimento de biomassa da parte aérea e radicular das plantas de feijão e arroz, e melhor distribuição das raízes em profundidade. O feijão, mesmo não sendo classificado como planta acumuladora de Si, possuiu o mesmo conteúdo de Si nas folhas que o arroz, quando houve alta disponibilidade no solo devido à aplicação do CaSiO_3 . Os elementos metálicos, como o Al, Fe e Mn, são fortemente influenciados pela H_4SiO_4 no solo e na planta, diminuindo os teores e conteúdos nos tecidos vegetais, principalmente na espécie acumuladora de Si (arroz).

Sugere-se que mais pesquisas sejam feitas para entender melhor a dinâmica do silício no solo e como a formação de polímeros de Si pode afetar processos físico-químicos no solo e seu efeito no crescimento e nutrição da planta, principalmente relacionado à interação com os elementos químicos metálicos como Mn, Fe, Zn e Al.

APÊNDICE

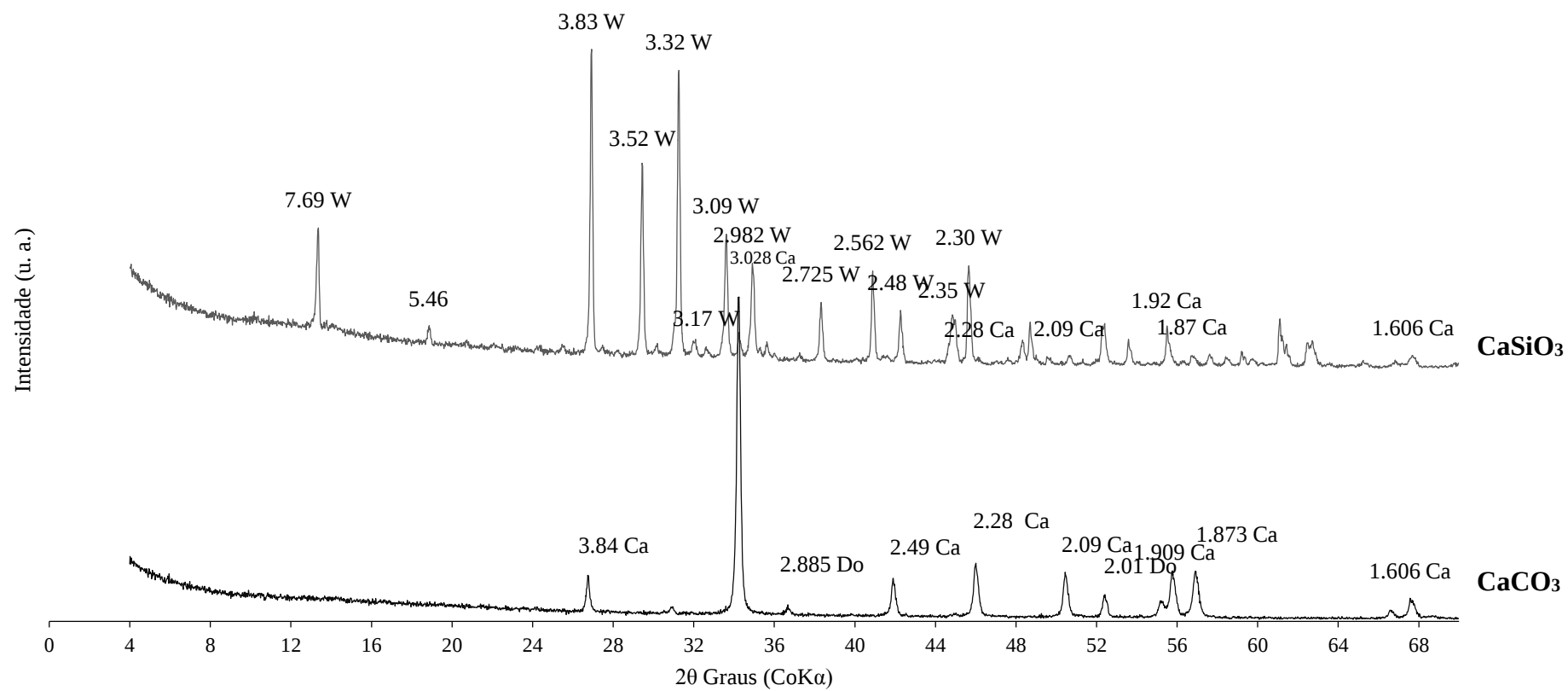


Figura 1. Difratoograma de Raios-X no Pó (DRXP) do carbonato de cálcio (CaCO₃) e metassilicato de cálcio (CaSiO₃) utilizados no experimento. Ca: Calcita; Do: Dolomita; W: Wollastonita.

Tabela 1. Teor médio $\pm$ erro-padrão dos elementos analisados na folha da planta de feijão (F) e arroz (A).

Trat.	Al mg kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	K g kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹	Mg g kg ⁻¹	P g kg ⁻¹	Si g kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹
F-T	112,07 $\pm$ 17,41	0,40 $\pm$ 0,126	38,61 $\pm$ 0,433	143,85 $\pm$ 10,606	25,48 $\pm$ 3,360	340,91 $\pm$ 48,857	7,44 $\pm$ 1,429	21,76 $\pm$ 4,149	6,49 $\pm$ 0,84	91,99 $\pm$ 13,099
F-G	129,67 $\pm$ 0,059	1,12 $\pm$ 0,086	19,65 $\pm$ 0,389	84,93 $\pm$ 4,649	24,08 $\pm$ 0,273	237,32 $\pm$ 20,394	6,20 $\pm$ 0,399	10,48 $\pm$ 0,580	4,18 $\pm$ 0,52	25,94 $\pm$ 3,079
F-C	85,22 $\pm$ 0,068	4,93 $\pm$ 0,382	34,01 $\pm$ 6,345	119,06 $\pm$ 2,938	22,50 $\pm$ 1,278	129,83 $\pm$ 5,310	3,88 $\pm$ 0,277	12,96 $\pm$ 1,516	2,58 $\pm$ 0,23	14,16 $\pm$ 0,100
F-Si	86,78 $\pm$ 0,182	3,74 $\pm$ 0,221	16,17 $\pm$ 0,426	82,71 $\pm$ 2,493	18,68 $\pm$ 1,345	145,97 $\pm$ 2,526	3,46 $\pm$ 0,152	7,79 $\pm$ 0,383	7,77 $\pm$ 0,37	10,16 $\pm$ 0,145
F-Si+G	90,15 $\pm$ 0,113	4,81 $\pm$ 0,198	21,27 $\pm$ 4,412	96,89 $\pm$ 8,299	21,53 $\pm$ 1,265	173,80 $\pm$ 4,900	4,15 $\pm$ 0,309	9,12 $\pm$ 0,374	7,72 $\pm$ 0,56	16,87 $\pm$ 1,995
F-C+G	101,83 $\pm$ 0,235	4,89 $\pm$ 0,049	37,72 $\pm$ 2,112	125,70 $\pm$ 13,992	21,00 $\pm$ 0,165	152,37 $\pm$ 6,996	4,32 $\pm$ 0,129	11,83 $\pm$ 0,803	2,32 $\pm$ 0,23	14,35 $\pm$ 0,846
A-T	341,83 $\pm$ 0,126	0,36 $\pm$ 0,101	41,61 $\pm$ 2,233	154,16 $\pm$ 37,870	24,90 $\pm$ 1,690	695,87 $\pm$ 41,777	4,12 $\pm$ 0,398	32,80 $\pm$ 2,362	10,66 $\pm$ 0,39	76,00 $\pm$ 11,213
A-G	170,15 $\pm$ 0,341	0,48 $\pm$ 0,023	43,20 $\pm$ 1,540	191,88 $\pm$ 9,606	25,38 $\pm$ 1,109	719,72 $\pm$ 59,496	4,35 $\pm$ 0,257	27,06 $\pm$ 0,281	10,80 $\pm$ 0,23	70,27 $\pm$ 9,785
A-C	62,15 $\pm$ 0,426	1,12 $\pm$ 0,053	43,14 $\pm$ 2,088	121,80 $\pm$ 4,320	24,09 $\pm$ 2,815	801,57 $\pm$ 44,273	4,82 $\pm$ 0,123	22,46 $\pm$ 0,529	14,42 $\pm$ 1,09	39,38 $\pm$ 2,414
A-Si	56,63 $\pm$ 0,609	0,75 $\pm$ 0,027	38,60 $\pm$ 0,520	110,78 $\pm$ 25,535	24,27 $\pm$ 2,653	549,06 $\pm$ 37,598	3,02 $\pm$ 0,230	16,42 $\pm$ 1,138	22,99 $\pm$ 0,74	35,81 $\pm$ 8,750
A-Si+G	67,45 $\pm$ 0,498	0,85 $\pm$ 0,045	36,90 $\pm$ 2,951	121,17 $\pm$ 20,998	24,13 $\pm$ 4,093	588,83 $\pm$ 62,237	3,03 $\pm$ 0,426	17,54 $\pm$ 2,292	22,93 $\pm$ 0,77	30,95 $\pm$ 4,753
A-C+G	66,56 $\pm$ 0,081	1,12 $\pm$ 0,101	35,96 $\pm$ 1,413	113,43 $\pm$ 15,645	25,99 $\pm$ 3,020	790,52 $\pm$ 86,350	4,63 $\pm$ 0,151	20,18 $\pm$ 0,507	11,76 $\pm$ 0,54	36,50 $\pm$ 2,621
C.V. %	23,69	13,39	14,35	22,58	13,89	14,13	18,58	16,23	9,09	30,18

Tabela 2. Conteúdo médio $\pm$ erro-padrão dos elementos analisados na folha da planta de feijão (F) e arroz (A).

Trat	Al µg	Ca mg	N mg	Fe µg	K mg	Mn µg	Mg mg	P mg	Si mg	Zn µg
F-T	161,73 $\pm$ 35,909	0,51 $\pm$ 0,035	57,15 $\pm$ 11,43	211,74 $\pm$ 42,454	35,83 $\pm$ 3,969	476,83 $\pm$ 49,188	10,19 $\pm$ 0,904	29,78 $\pm$ 1,966	9,13 $\pm$ 0,981	128,86 $\pm$ 14,425
F-G	600,49 $\pm$ 36,431	5,20 $\pm$ 0,544	90,78 $\pm$ 2,57	392,68 $\pm$ 25,747	111,39 $\pm$ 4,790	1096,87 $\pm$ 99,615	28,73 $\pm$ 2,389	48,54 $\pm$ 3,624	19,25 $\pm$ 2,315	119,01 $\pm$ 10,223
F-C	542,61 $\pm$ 21,639	31,33 $\pm$ 2,126	216,10 $\pm$ 39,59	757,68 $\pm$ 10,545	143,11 $\pm$ 6,604	826,36 $\pm$ 31,402	24,66 $\pm$ 1,487	82,34 $\pm$ 8,901	16,43 $\pm$ 1,610	90,13 $\pm$ 0,400
F-Si	621,69 $\pm$ 76,284	26,74 $\pm$ 1,971	115,56 $\pm$ 5,41	591,90 $\pm$ 34,567	133,35 $\pm$ 9,880	1042,55 $\pm$ 33,313	24,72 $\pm$ 1,104	55,54 $\pm$ 2,300	55,32 $\pm$ 0,924	72,65 $\pm$ 3,105
F-Si+G	612,69 $\pm$ 46,315	32,68 $\pm$ 1,696	143,08 $\pm$ 26,01	656,46 $\pm$ 48,658	146,35 $\pm$ 10,177	1179,19 $\pm$ 24,539	28,20 $\pm$ 2,382	61,82 $\pm$ 1,706	52,56 $\pm$ 4,831	114,15 $\pm$ 12,346
F-C+G	673,53 $\pm$ 108,438	32,14 $\pm$ 0,533	248,68 $\pm$ 20,19	829,21 $\pm$ 107,705	137,98 $\pm$ 2,476	1001,05 $\pm$ 45,689	28,40 $\pm$ 1,261	77,91 $\pm$ 6,659	15,18 $\pm$ 1,161	94,07 $\pm$ 3,464
A-T	543,66 $\pm$ 40,642	0,58 $\pm$ 0,158	66,18 $\pm$ 3,721	244,73 $\pm$ 59,257	39,59 $\pm$ 2,732	1106,10 $\pm$ 64,034	6,56 $\pm$ 0,641	52,18 $\pm$ 3,944	16,95 $\pm$ 0,568	120,94 $\pm$ 18,247
A-G	343,52 $\pm$ 75,306	0,97 $\pm$ 0,087	87,02 $\pm$ 6,335	384,62 $\pm$ 15,270	50,88 $\pm$ 1,726	1448,84 $\pm$ 144,126	8,75 $\pm$ 0,604	54,34 $\pm$ 1,806	21,73 $\pm$ 1,141	140,08 $\pm$ 16,874
A-C	140,24 $\pm$ 49,729	2,40 $\pm$ 0,176	93,31 $\pm$ 12,834	262,81 $\pm$ 34,946	50,50 $\pm$ 0,630	1717,47 $\pm$ 176,341	10,31 $\pm$ 0,893	48,25 $\pm$ 5,114	30,95 $\pm$ 3,634	85,60 $\pm$ 13,543
A-Si	144,91 $\pm$ 57,146	1,86 $\pm$ 0,136	96,01 $\pm$ 4,844	281,08 $\pm$ 78,461	60,79 $\pm$ 8,903	1372,53 $\pm$ 152,447	7,55 $\pm$ 0,928	41,09 $\pm$ 4,780	57,10 $\pm$ 2,246	90,95 $\pm$ 26,603
A-Si+G	161,06 $\pm$ 53,014	2,03 $\pm$ 0,253	88,53 $\pm$ 11,924	284,69 $\pm$ 26,168	58,02 $\pm$ 15,512	1407,14 $\pm$ 268,718	7,26 $\pm$ 1,702	42,07 $\pm$ 9,560	54,71 $\pm$ 4,998	72,75 $\pm$ 2,830
A-C+G	120,55 $\pm$ 20,872	2,03 $\pm$ 0,450	64,85 $\pm$ 5,191	206,79 $\pm$ 54,737	46,78 $\pm$ 6,632	1438,11 $\pm$ 338,219	8,37 $\pm$ 1,206	36,43 $\pm$ 4,935	21,22 $\pm$ 1,900	66,38 $\pm$ 14,041
C.V.%	23,30	14,66	25,73	19,93	13,28	17,51	14,58	15,26	14,02	23,42

Tabela 3. Valores médios $\pm$ erro-padrão das variáveis relacionadas ao crescimento da planta de feijão (F) e arroz (A).

Tratamento	MPA	MPR	AF	AFEsp.	PA/PR
	g	g	cm²	m² kg⁻¹	kg kg⁻¹
F-T	2,22 $\pm$ 0,447	0,89 $\pm$ 0,10	7,87 $\pm$ 1,07	0,55 $\pm$ 0,06	2,48 $\pm$ 0,44
F-G	7,65 $\pm$ 0,147	3,24 $\pm$ 0,23	14,57 $\pm$ 0,57	0,32 $\pm$ 0,02	2,38 $\pm$ 0,16
F-C	10,29 $\pm$ 0,264	4,93 $\pm$ 0,56	23,94 $\pm$ 1,01	0,38 $\pm$ 0,02	2,14 $\pm$ 0,25
F-Si	11,27 $\pm$ 0,551	4,69 $\pm$ 0,36	20,41 $\pm$ 0,35	0,29 $\pm$ 0,00	2,42 $\pm$ 0,08
F-Si+G	11,16 $\pm$ 0,290	5,33 $\pm$ 0,21	20,21 $\pm$ 0,56	0,30 $\pm$ 0,01	2,10 $\pm$ 0,14
F-C+G	10,24 $\pm$ 0,229	4,73 $\pm$ 0,25	23,35 $\pm$ 1,72	0,35 $\pm$ 0,02	2,18 $\pm$ 0,11
C.V.%	6,49	23,69	13,39	19,63	16,95
A-T	1,59 $\pm$ 0,006	0,69 $\pm$ 0,06	3,19 $\pm$ 0,11	0,20 $\pm$ 0,01	2,33 $\pm$ 0,20
A-G	2,01 $\pm$ 0,085	0,96 $\pm$ 0,20	4,00 $\pm$ 0,29	0,20 $\pm$ 0,01	2,22 $\pm$ 0,32
A-C	2,15 $\pm$ 0,235	1,10 $\pm$ 0,13	4,25 $\pm$ 0,31	0,20 $\pm$ 0,01	1,97 $\pm$ 0,12
A-Si	2,49 $\pm$ 0,112	1,31 $\pm$ 0,18	4,42 $\pm$ 0,15	0,18 $\pm$ 0,00	1,99 $\pm$ 0,37
A-Si+G	2,38 $\pm$ 0,147	1,29 $\pm$ 0,10	4,51 $\pm$ 0,21	0,19 $\pm$ 0,00	1,85 $\pm$ 0,07
A-C+G	1,81 $\pm$ 0,145	0,98 $\pm$ 0,14	3,74 $\pm$ 0,17	0,21 $\pm$ 0,01	1,89 $\pm$ 0,15
C.V.%	12,44	24,50	10,15	5,85	20,21

MPA = Massa da Parte Aérea; MPR = Massa da Parte Radicular; AF = Área Foliar; AFEsp = Área Foliar Específica; PA/PR = Razão da MPA e MPR.

Tabela 4. Valores médios $\pm$ erro-padrão das variáveis relacionadas à fertilidade do solo e o crescimento de raízes no solo cultivado com feijão (F) e arroz (A) nas diferentes profundidades (a cada 5 cm) de 0-40 cm.

(continua)

Trat.	Prof cm	pH	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Si-HAc mg dm ⁻³	Raiz mg
F-T	0-5	5,14 $\pm$ 0,046	0,91 $\pm$ 0,035	0,35 $\pm$ 0,034	1,32 $\pm$ 0,101	299,62 $\pm$ 16,286	26,53 $\pm$ 0,74	648,93 $\pm$ 56,46
F-T	05-10	4,71 $\pm$ 0,023	1,88 $\pm$ 0,000	0,03 $\pm$ 0,013	0,35 $\pm$ 0,050	161,15 $\pm$ 15,053	29,84 $\pm$ 1,35	99,37 $\pm$ 17,16
F-T	10-15	4,57 $\pm$ 0,023	2,00 $\pm$ 0,046	0,03 $\pm$ 0,004	0,22 $\pm$ 0,022	106,09 $\pm$ 5,497	33,30 $\pm$ 0,77	52,37 $\pm$ 9,56
F-T	15-20	4,53 $\pm$ 0,006	2,02 $\pm$ 0,035	0,02 $\pm$ 0,007	0,20 $\pm$ 0,020	96,51 $\pm$ 2,320	31,03 $\pm$ 2,11	30,30 $\pm$ 7,19
F-T	20-25	4,61 $\pm$ 0,027	1,99 $\pm$ 0,060	0,04 $\pm$ 0,009	0,12 $\pm$ 0,010	92,17 $\pm$ 10,568	30,09 $\pm$ 1,21	27,23 $\pm$ 7,26
F-T	25-30	4,48 $\pm$ 0,032	1,81 $\pm$ 0,035	0,01 $\pm$ 0,002	0,03 $\pm$ 0,004	60,95 $\pm$ 3,138	32,14 $\pm$ 1,95	19,50 $\pm$ 5,06
F-T	30-35	4,31 $\pm$ 0,066	1,88 $\pm$ 0,060	0,02 $\pm$ 0,002	0,02 $\pm$ 0,004	46,67 $\pm$ 2,529	30,59 $\pm$ 2,41	8,93 $\pm$ 2,77
F-T	35-40	4,52 $\pm$ 0,131	1,87 $\pm$ 0,122	0,06 $\pm$ 0,021	0,07 $\pm$ 0,025	51,05 $\pm$ 3,319	32,44 $\pm$ 3,04	4,97 $\pm$ 2,87
F-G	0-5	4,76 $\pm$ 0,050	1,34 $\pm$ 0,122	0,39 $\pm$ 0,066	1,14 $\pm$ 0,179	225,16 $\pm$ 10,719	23,01 $\pm$ 3,61	1109,20 $\pm$ 76,24
F-G	05-10	4,39 $\pm$ 0,062	2,04 $\pm$ 0,030	0,27 $\pm$ 0,006	0,42 $\pm$ 0,005	83,26 $\pm$ 3,414	29,58 $\pm$ 0,67	397,40 $\pm$ 51,15
F-G	10-15	4,49 $\pm$ 0,003	1,95 $\pm$ 0,076	0,40 $\pm$ 0,030	0,44 $\pm$ 0,043	70,75 $\pm$ 3,611	24,29 $\pm$ 2,26	393,07 $\pm$ 47,56
F-G	15-20	4,55 $\pm$ 0,013	1,87 $\pm$ 0,046	0,38 $\pm$ 0,011	0,39 $\pm$ 0,015	74,65 $\pm$ 4,331	26,68 $\pm$ 2,66	355,07 $\pm$ 14,77
F-G	20-25	4,62 $\pm$ 0,015	1,67 $\pm$ 0,000	0,35 $\pm$ 0,031	0,32 $\pm$ 0,020	71,15 $\pm$ 2,718	27,97 $\pm$ 0,84	379,03 $\pm$ 34,96
F-G	25-30	4,71 $\pm$ 0,030	1,74 $\pm$ 0,126	0,18 $\pm$ 0,021	0,23 $\pm$ 0,069	72,60 $\pm$ 6,516	23,76 $\pm$ 2,51	284,07 $\pm$ 16,40
F-G	30-35	4,51 $\pm$ 0,036	1,95 $\pm$ 0,070	0,08 $\pm$ 0,009	0,05 $\pm$ 0,006	54,66 $\pm$ 1,195	27,28 $\pm$ 1,90	223,23 $\pm$ 28,94
F-G	35-40	4,46 $\pm$ 0,063	1,88 $\pm$ 0,060	0,15 $\pm$ 0,013	0,09 $\pm$ 0,011	59,69 $\pm$ 2,569	28,48 $\pm$ 1,74	97,17 $\pm$ 12,16

Tabela 4. Valores médios $\pm$ erro-padrão das variáveis relacionadas à fertilidade do solo e o crescimento de raízes no solo cultivado com feijão (F) e arroz (A) nas diferentes profundidades (a cada 5 cm) de 0-40 cm.

(continuação)								
Trat.	Prof cm	pH	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Si-HAc mg dm ⁻³	Raiz mg
F-C	0-5	5,61 $\pm$ 0,037	0,19 $\pm$ 0,017	2,04 $\pm$ 0,092	1,74 $\pm$ 0,098	322,62 $\pm$ 18,481	21,39 $\pm$ 2,15	1510,50 $\pm$ 195,10
F-C	05-10	5,65 $\pm$ 0,049	0,23 $\pm$ 0,076	4,13 $\pm$ 0,277	0,91 $\pm$ 0,068	92,04 $\pm$ 8,219	21,87 $\pm$ 1,25	819,20 $\pm$ 54,54
F-C	10-15	5,68 $\pm$ 0,098	0,10 $\pm$ 0,000	5,08 $\pm$ 0,287	0,52 $\pm$ 0,076	62,05 $\pm$ 6,511	25,05 $\pm$ 2,01	862,43 $\pm$ 105,38
F-C	15-20	4,84 $\pm$ 0,067	1,22 $\pm$ 0,174	1,51 $\pm$ 0,242	0,14 $\pm$ 0,023	50,28 $\pm$ 3,617	21,63 $\pm$ 3,98	432,70 $\pm$ 50,28
F-C	20-25	4,61 $\pm$ 0,000	1,57 $\pm$ 0,060	0,86 $\pm$ 0,074	0,11 $\pm$ 0,031	47,83 $\pm$ 4,370	20,59 $\pm$ 2,02	344,50 $\pm$ 30,00
F-C	25-30	4,47 $\pm$ 0,142	1,69 $\pm$ 0,046	0,71 $\pm$ 0,081	0,08 $\pm$ 0,004	47,61 $\pm$ 1,367	23,27 $\pm$ 1,91	334,33 $\pm$ 18,72
F-C	30-35	4,63 $\pm$ 0,032	1,73 $\pm$ 0,030	0,29 $\pm$ 0,076	0,05 $\pm$ 0,010	59,03 $\pm$ 12,038	22,98 $\pm$ 1,36	336,57 $\pm$ 20,59
F-C	35-40	4,36 $\pm$ 0,103	1,80 $\pm$ 0,017	0,25 $\pm$ 0,026	0,09 $\pm$ 0,039	57,88 $\pm$ 2,615	26,79 $\pm$ 0,30	291,77 $\pm$ 22,47
F-Si	0-5	5,64 $\pm$ 0,036	0,16 $\pm$ 0,030	2,52 $\pm$ 0,088	1,65 $\pm$ 0,115	282,97 $\pm$ 15,808	42,64 $\pm$ 4,69	1408,03 $\pm$ 112,99
F-Si	05-10	5,56 $\pm$ 0,026	0,14 $\pm$ 0,070	3,44 $\pm$ 0,224	0,97 $\pm$ 0,253	81,07 $\pm$ 11,038	73,38 $\pm$ 1,48	663,50 $\pm$ 51,75
F-Si	10-15	5,52 $\pm$ 0,075	0,14 $\pm$ 0,035	3,58 $\pm$ 0,122	0,73 $\pm$ 0,272	63,28 $\pm$ 4,344	74,91 $\pm$ 5,87	721,33 $\pm$ 49,62
F-Si	15-20	4,74 $\pm$ 0,054	1,08 $\pm$ 0,364	1,41 $\pm$ 0,306	0,34 $\pm$ 0,180	60,52 $\pm$ 0,889	29,51 $\pm$ 1,77	515,50 $\pm$ 26,81
F-Si	20-25	4,61 $\pm$ 0,009	1,74 $\pm$ 0,092	0,65 $\pm$ 0,058	0,10 $\pm$ 0,010	56,13 $\pm$ 3,898	26,47 $\pm$ 2,48	392,47 $\pm$ 34,41
F-Si	25-30	4,60 $\pm$ 0,045	1,73 $\pm$ 0,030	0,32 $\pm$ 0,080	0,07 $\pm$ 0,011	57,75 $\pm$ 2,799	26,48 $\pm$ 1,81	362,20 $\pm$ 47,27
F-Si	30-35	4,48 $\pm$ 0,093	1,81 $\pm$ 0,035	0,14 $\pm$ 0,012	0,03 $\pm$ 0,003	66,55 $\pm$ 11,384	23,26 $\pm$ 3,00	350,93 $\pm$ 22,06
F-Si	35-40	4,37 $\pm$ 0,038	1,81 $\pm$ 0,035	0,20 $\pm$ 0,003	0,04 $\pm$ 0,004	66,45 $\pm$ 4,458	23,86 $\pm$ 3,74	272,10 $\pm$ 15,76

Tabela 4. Valores médios $\pm$ erro-padrão das variáveis relacionadas à fertilidade do solo e o crescimento de raízes no solo cultivado com feijão (F) e arroz (A) nas diferentes profundidades (a cada 5 cm) de 0-40 cm.

(continuação)

Trat.	Prof cm	pH	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Si-HAc mg dm ⁻³	Raiz mg
F-Si+G	0-5	5,54 $\pm$ 0,034	0,23 $\pm$ 0,017	2,26 $\pm$ 0,117	1,61 $\pm$ 0,033	283,75 $\pm$ 21,516	42,13 $\pm$ 4,06	1245,93 $\pm$ 79,18
F-Si+G	05-10	5,65 $\pm$ 0,029	0,16 $\pm$ 0,030	3,43 $\pm$ 0,216	0,81 $\pm$ 0,067	71,59 $\pm$ 7,222	81,56 $\pm$ 10,16	973,50 $\pm$ 92,02
F-Si+G	10-15	5,57 $\pm$ 0,041	0,14 $\pm$ 0,035	4,12 $\pm$ 0,087	0,52 $\pm$ 0,077	55,00 $\pm$ 4,968	80,60 $\pm$ 7,33	860,33 $\pm$ 64,24
F-Si+G	15-20	4,67 $\pm$ 0,026	1,38 $\pm$ 0,046	1,46 $\pm$ 0,073	0,15 $\pm$ 0,025	51,33 $\pm$ 6,615	30,72 $\pm$ 2,02	513,03 $\pm$ 30,89
F-Si+G	20-25	4,52 $\pm$ 0,033	1,66 $\pm$ 0,046	0,91 $\pm$ 0,018	0,10 $\pm$ 0,015	53,48 $\pm$ 2,727	24,08 $\pm$ 0,90	523,03 $\pm$ 25,08
F-Si+G	25-30	4,58 $\pm$ 0,010	1,71 $\pm$ 0,035	1,06 $\pm$ 0,017	0,12 $\pm$ 0,017	68,69 $\pm$ 9,129	24,93 $\pm$ 2,84	554,57 $\pm$ 50,58
F-Si+G	30-35	4,59 $\pm$ 0,026	1,73 $\pm$ 0,052	0,61 $\pm$ 0,104	0,09 $\pm$ 0,022	80,15 $\pm$ 13,248	25,45 $\pm$ 1,16	389,80 $\pm$ 38,53
F-Si+G	35-40	4,50 $\pm$ 0,035	1,71 $\pm$ 0,035	0,29 $\pm$ 0,058	0,05 $\pm$ 0,015	59,65 $\pm$ 6,016	29,84 $\pm$ 2,50	269,83 $\pm$ 27,66
F-C+G	0-5	5,58 $\pm$ 0,009	0,16 $\pm$ 0,052	2,59 $\pm$ 0,274	1,70 $\pm$ 0,198	291,54 $\pm$ 6,406	23,63 $\pm$ 3,90	1256,97 $\pm$ 39,19
F-C+G	05-10	5,64 $\pm$ 0,032	0,17 $\pm$ 0,035	3,50 $\pm$ 0,153	0,68 $\pm$ 0,041	90,54 $\pm$ 11,175	20,77 $\pm$ 1,79	1096,47 $\pm$ 49,58
F-C+G	10-15	5,75 $\pm$ 0,003	0,28 $\pm$ 0,174	3,97 $\pm$ 0,041	0,43 $\pm$ 0,029	69,40 $\pm$ 12,355	28,06 $\pm$ 0,86	790,17 $\pm$ 63,29
F-C+G	15-20	4,79 $\pm$ 0,056	1,22 $\pm$ 0,046	1,42 $\pm$ 0,069	0,15 $\pm$ 0,014	50,03 $\pm$ 0,781	14,76 $\pm$ 2,26	415,97 $\pm$ 33,18
F-C+G	20-25	4,55 $\pm$ 0,003	1,76 $\pm$ 0,063	0,85 $\pm$ 0,079	0,09 $\pm$ 0,006	56,06 $\pm$ 4,120	19,01 $\pm$ 2,79	292,20 $\pm$ 23,53
F-C+G	25-30	4,57 $\pm$ 0,013	1,73 $\pm$ 0,080	0,95 $\pm$ 0,096	0,08 $\pm$ 0,008	69,96 $\pm$ 11,867	22,14 $\pm$ 1,03	275,13 $\pm$ 28,13
F-C+G	30-35	4,58 $\pm$ 0,017	1,64 $\pm$ 0,035	0,96 $\pm$ 0,043	0,09 $\pm$ 0,009	67,88 $\pm$ 8,664	25,95 $\pm$ 0,60	337,73 $\pm$ 52,65
F-C+G	35-40	4,63 $\pm$ 0,020	1,69 $\pm$ 0,017	0,62 $\pm$ 0,034	0,07 $\pm$ 0,006	71,72 $\pm$ 11,204	27,83 $\pm$ 1,86	264,17 $\pm$ 20,20

Tabela 4. Valores médios $\pm$ erro-padrão das variáveis relacionadas à fertilidade do solo e o crescimento de raízes no solo cultivado com feijão (F) e arroz (A) nas diferentes profundidades (a cada 5 cm) de 0-40 cm.

(continuação)								
Trat.	Prof cm	pH	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Si-HAc mg dm ⁻³	Raiz mg
A-T	0-5	5,08 $\pm$ 0,090	0,89 $\pm$ 0,030	0,27 $\pm$ 0,016	0,95 $\pm$ 0,028	299,39 $\pm$ 14,874	10,94 $\pm$ 3,56	498,53 $\pm$ 72,26
A-T	05-10	4,67 $\pm$ 0,009	1,78 $\pm$ 0,000	0,01 $\pm$ 0,009	0,24 $\pm$ 0,024	164,39 $\pm$ 14,010	11,77 $\pm$ 0,86	117,83 $\pm$ 4,24
A-T	10-15	4,54 $\pm$ 0,012	1,92 $\pm$ 0,017	0,03 $\pm$ 0,008	0,17 $\pm$ 0,020	111,18 $\pm$ 0,940	16,54 $\pm$ 1,28	45,60 $\pm$ 4,28
A-T	15-20	4,52 $\pm$ 0,010	1,99 $\pm$ 0,000	0,02 $\pm$ 0,002	0,16 $\pm$ 0,019	123,79 $\pm$ 19,804	16,90 $\pm$ 1,74	19,77 $\pm$ 2,81
A-T	20-25	4,60 $\pm$ 0,015	1,85 $\pm$ 0,035	0,04 $\pm$ 0,001	0,11 $\pm$ 0,010	101,74 $\pm$ 10,184	14,62 $\pm$ 1,13	8,63 $\pm$ 2,03
A-T	25-30	4,61 $\pm$ 0,006	1,87 $\pm$ 0,017	0,04 $\pm$ 0,003	0,06 $\pm$ 0,001	80,54 $\pm$ 5,020	14,99 $\pm$ 1,33	2,90 $\pm$ 1,34
A-T	30-35	4,48 $\pm$ 0,027	1,83 $\pm$ 0,030	0,03 $\pm$ 0,002	0,03 $\pm$ 0,001	48,99 $\pm$ 1,800	15,72 $\pm$ 0,07	0,00 $\pm$ 0,00
A-T	35-40	4,71 $\pm$ 0,090	1,69 $\pm$ 0,143	0,07 $\pm$ 0,009	0,07 $\pm$ 0,025	59,46 $\pm$ 5,860	14,23 $\pm$ 5,35	0,00 $\pm$ 0,00
A-G	0-5	4,96 $\pm$ 0,072	0,96 $\pm$ 0,201	0,40 $\pm$ 0,037	1,00 $\pm$ 0,119	312,96 $\pm$ 22,303	9,72 $\pm$ 3,09	587,90 $\pm$ 145,59
A-G	05-10	4,52 $\pm$ 0,009	1,88 $\pm$ 0,052	0,15 $\pm$ 0,018	0,25 $\pm$ 0,009	105,77 $\pm$ 4,274	7,97 $\pm$ 1,31	171,33 $\pm$ 8,06
A-G	10-15	4,53 $\pm$ 0,015	1,85 $\pm$ 0,017	0,20 $\pm$ 0,015	0,26 $\pm$ 0,014	121,94 $\pm$ 30,716	10,28 $\pm$ 1,79	109,37 $\pm$ 8,92
A-G	15-20	4,55 $\pm$ 0,010	1,71 $\pm$ 0,035	0,25 $\pm$ 0,005	0,25 $\pm$ 0,017	87,78 $\pm$ 3,134	6,01 $\pm$ 3,17	43,73 $\pm$ 3,64
A-G	20-25	4,61 $\pm$ 0,012	1,62 $\pm$ 0,052	0,36 $\pm$ 0,002	0,32 $\pm$ 0,019	91,61 $\pm$ 2,985	13,72 $\pm$ 3,43	27,50 $\pm$ 4,66
A-G	25-30	4,63 $\pm$ 0,009	1,55 $\pm$ 0,017	0,31 $\pm$ 0,009	0,29 $\pm$ 0,021	85,39 $\pm$ 0,600	14,24 $\pm$ 0,45	13,93 $\pm$ 3,22
A-G	30-35	4,68 $\pm$ 0,012	1,64 $\pm$ 0,035	0,15 $\pm$ 0,020	0,19 $\pm$ 0,018	80,04 $\pm$ 7,933	12,31 $\pm$ 0,53	5,37 $\pm$ 1,01
A-G	35-40	4,73 $\pm$ 0,085	1,62 $\pm$ 0,080	0,13 $\pm$ 0,017	0,09 $\pm$ 0,013	56,58 $\pm$ 0,805	18,74 $\pm$ 2,09	3,90 $\pm$ 1,45

Tabela 4. Valores médios $\pm$ erro-padrão das variáveis relacionadas à fertilidade do solo e o crescimento de raízes no solo cultivado com feijão (F) e arroz (A) nas diferentes profundidades (a cada 5 cm) de 0-40 cm.

(continuação)								
Trat.	Prof cm	pH	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Si-HAc mg dm ⁻³	Raiz mg
A-C	0-5	5,57 $\pm$ 0,015	0,19 $\pm$ 0,017	2,37 $\pm$ 0,349	1,54 $\pm$ 0,060	306,29 $\pm$ 5,432	7,02 $\pm$ 2,18	582,93 $\pm$ 70,97
A-C	05-10	5,84 $\pm$ 0,023	0,19 $\pm$ 0,063	3,45 $\pm$ 0,318	0,82 $\pm$ 0,023	201,16 $\pm$ 12,619	8,89 $\pm$ 0,97	210,63 $\pm$ 24,44
A-C	10-15	5,78 $\pm$ 0,022	0,35 $\pm$ 0,194	3,47 $\pm$ 0,219	0,43 $\pm$ 0,028	152,77 $\pm$ 9,917	6,36 $\pm$ 1,56	125,20 $\pm$ 7,31
A-C	15-20	4,94 $\pm$ 0,147	1,17 $\pm$ 0,206	1,53 $\pm$ 0,340	0,16 $\pm$ 0,025	97,20 $\pm$ 5,027	10,89 $\pm$ 1,00	91,70 $\pm$ 8,51
A-C	20-25	4,59 $\pm$ 0,012	1,78 $\pm$ 0,060	0,70 $\pm$ 0,053	0,07 $\pm$ 0,007	67,95 $\pm$ 1,418	7,77 $\pm$ 2,00	46,83 $\pm$ 6,01
A-C	25-30	4,59 $\pm$ 0,013	1,81 $\pm$ 0,092	0,71 $\pm$ 0,025	0,07 $\pm$ 0,001	57,84 $\pm$ 0,593	6,68 $\pm$ 2,92	24,00 $\pm$ 1,60
A-C	30-35	4,62 $\pm$ 0,009	1,78 $\pm$ 0,060	0,59 $\pm$ 0,056	0,06 $\pm$ 0,003	54,94 $\pm$ 1,923	8,49 $\pm$ 1,81	11,83 $\pm$ 1,17
A-C	35-40	4,67 $\pm$ 0,113	1,73 $\pm$ 0,109	0,36 $\pm$ 0,106	0,05 $\pm$ 0,014	53,64 $\pm$ 7,081	13,65 $\pm$ 1,77	6,27 $\pm$ 1,00
A-Si	0-5	5,69 $\pm$ 0,033	0,26 $\pm$ 0,080	1,88 $\pm$ 0,089	1,26 $\pm$ 0,076	311,74 $\pm$ 11,807	31,90 $\pm$ 2,95	702,17 $\pm$ 96,60
A-Si	05-10	5,79 $\pm$ 0,035	0,16 $\pm$ 0,030	2,60 $\pm$ 0,139	0,64 $\pm$ 0,035	193,27 $\pm$ 5,805	56,98 $\pm$ 4,23	214,27 $\pm$ 17,78
A-Si	10-15	5,81 $\pm$ 0,022	0,37 $\pm$ 0,184	2,99 $\pm$ 0,073	0,47 $\pm$ 0,052	143,80 $\pm$ 0,525	60,46 $\pm$ 3,02	159,80 $\pm$ 11,60
A-Si	15-20	4,87 $\pm$ 0,093	1,39 $\pm$ 0,174	1,11 $\pm$ 0,201	0,16 $\pm$ 0,018	79,98 $\pm$ 4,376	18,68 $\pm$ 5,79	118,80 $\pm$ 15,88
A-Si	20-25	4,58 $\pm$ 0,012	1,78 $\pm$ 0,060	0,64 $\pm$ 0,003	0,09 $\pm$ 0,015	55,94 $\pm$ 2,194	11,04 $\pm$ 1,56	58,03 $\pm$ 6,15
A-Si	25-30	4,57 $\pm$ 0,019	1,76 $\pm$ 0,046	0,58 $\pm$ 0,032	0,09 $\pm$ 0,008	51,57 $\pm$ 3,742	14,28 $\pm$ 1,38	33,77 $\pm$ 1,77
A-Si	30-35	4,61 $\pm$ 0,012	1,57 $\pm$ 0,263	0,42 $\pm$ 0,025	0,07 $\pm$ 0,011	56,58 $\pm$ 9,735	16,02 $\pm$ 1,28	17,00 $\pm$ 2,23
A-Si	35-40	4,70 $\pm$ 0,023	1,78 $\pm$ 0,000	0,33 $\pm$ 0,049	0,06 $\pm$ 0,006	59,65 $\pm$ 19,583	17,45 $\pm$ 2,02	9,27 $\pm$ 0,37

Tabela 4. Valores médios $\pm$ erro-padrão das variáveis relacionadas à fertilidade do solo e o crescimento de raízes no solo cultivado com feijão (F) e arroz (A) nas diferentes profundidades (a cada 5 cm) de 0-40 cm.

(conclusão)								
Trat.	Prof cm	pH	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Si-HAc mg dm ⁻³	Raiz mg
A-Si+G	0-5	5,65 $\pm$ 0,044	0,19 $\pm$ 0,017	2,06 $\pm$ 0,091	1,36 $\pm$ 0,080	308,71 $\pm$ 9,117	30,49 $\pm$ 1,24	750,53 $\pm$ 73,74
A-Si+G	05-10	5,76 $\pm$ 0,067	0,31 $\pm$ 0,105	2,60 $\pm$ 0,277	0,61 $\pm$ 0,026	212,08 $\pm$ 2,599	48,04 $\pm$ 7,12	208,90 $\pm$ 13,61
A-Si+G	10-15	5,89 $\pm$ 0,051	0,24 $\pm$ 0,139	3,18 $\pm$ 0,154	0,46 $\pm$ 0,026	160,16 $\pm$ 4,761	67,17 $\pm$ 3,36	141,70 $\pm$ 9,95
A-Si+G	15-20	4,74 $\pm$ 0,083	1,57 $\pm$ 0,060	0,91 $\pm$ 0,084	0,13 $\pm$ 0,021	83,11 $\pm$ 3,711	18,45 $\pm$ 1,62	80,87 $\pm$ 6,46
A-Si+G	20-25	4,52 $\pm$ 0,012	1,87 $\pm$ 0,046	0,69 $\pm$ 0,034	0,09 $\pm$ 0,006	60,76 $\pm$ 2,934	15,23 $\pm$ 0,39	38,70 $\pm$ 1,88
A-Si+G	25-30	4,54 $\pm$ 0,009	1,67 $\pm$ 0,060	0,76 $\pm$ 0,024	0,09 $\pm$ 0,006	61,72 $\pm$ 4,256	16,19 $\pm$ 0,58	44,10 $\pm$ 6,41
A-Si+G	30-35	4,55 $\pm$ 0,007	1,74 $\pm$ 0,076	0,77 $\pm$ 0,024	0,10 $\pm$ 0,008	58,79 $\pm$ 0,493	16,78 $\pm$ 0,76	17,67 $\pm$ 2,02
A-Si+G	35-40	4,62 $\pm$ 0,031	1,62 $\pm$ 0,052	0,82 $\pm$ 0,039	0,11 $\pm$ 0,005	57,04 $\pm$ 2,697	17,44 $\pm$ 3,22	6,60 $\pm$ 0,72
A-C+G	0-5	5,57 $\pm$ 0,045	0,24 $\pm$ 0,092	1,97 $\pm$ 0,165	1,43 $\pm$ 0,151	318,32 $\pm$ 17,514	12,15 $\pm$ 1,11	528,67 $\pm$ 80,21
A-C+G	05-10	5,76 $\pm$ 0,038	0,14 $\pm$ 0,035	3,06 $\pm$ 0,166	0,70 $\pm$ 0,072	203,18 $\pm$ 10,926	15,81 $\pm$ 1,23	214,13 $\pm$ 16,00
A-C+G	10-15	5,78 $\pm$ 0,013	0,31 $\pm$ 0,105	3,36 $\pm$ 0,143	0,43 $\pm$ 0,071	139,14 $\pm$ 9,048	12,69 $\pm$ 0,33	107,00 $\pm$ 9,81
A-C+G	15-20	4,87 $\pm$ 0,064	1,12 $\pm$ 0,126	1,32 $\pm$ 0,203	0,15 $\pm$ 0,020	95,28 $\pm$ 7,658	13,16 $\pm$ 0,65	54,93 $\pm$ 2,68
A-C+G	20-25	4,53 $\pm$ 0,010	1,85 $\pm$ 0,035	0,69 $\pm$ 0,026	0,07 $\pm$ 0,011	71,77 $\pm$ 5,952	12,33 $\pm$ 1,85	35,93 $\pm$ 4,03
A-C+G	25-30	4,52 $\pm$ 0,023	1,81 $\pm$ 0,070	0,67 $\pm$ 0,040	0,06 $\pm$ 0,003	66,78 $\pm$ 1,602	10,47 $\pm$ 1,49	21,07 $\pm$ 1,83
A-C+G	30-35	4,58 $\pm$ 0,026	1,67 $\pm$ 0,060	0,90 $\pm$ 0,036	0,08 $\pm$ 0,005	61,79 $\pm$ 1,458	12,08 $\pm$ 0,97	9,20 $\pm$ 3,44
A-C+G	35-40	4,65 $\pm$ 0,030	1,55 $\pm$ 0,046	0,95 $\pm$ 0,071	0,09 $\pm$ 0,004	62,12 $\pm$ 3,655	19,04 $\pm$ 0,63	6,10 $\pm$ 2,83
C.V. %		2,64	11,61	18,19	29,58	14,63	19,94	32,91



Figura 2. Plantas de feijão e arroz em vasos com solo que recebeu diferentes tratamentos com corretivos da acidez e gesso, 38 dias após a emergência. Si= CaSiO_3 ; C= CaCO_3 ; G= CaSO_4 ; T= Testemunha.