UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

MARIANA DE CARVALHO RIBEIRO

AGROMINERAL SILICÁTICO NA CULTURA DO ARROZ COMO FONTE DE SILÍCIO E REMINERALIZADOR DE SOLOS

Ilha Solteira - SP
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MARIANA DE CARVALHO RIBEIRO

AGROMINERAL SILICÁTICO NA CULTURA DO ARROZ COMO FONTE DE SILÍCIO E REMINERALIZADOR DE SOLOS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Grau acadêmico de Mestre em Agronomia.

Área de Concentração: Sistema de Produção

Orientador: Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

R484a

Ribeiro, Mariana de Carvalho.
Agromineral silicático na cultura do arroz como fonte de silício e remineralizador de solos / Mariana de Carvalho Ribeiro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
83 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Thiago Assis Rodrigues Nogueira
Inclui bibliografia

1. Agricultura regenerativa. 2. *Oryza sativa* L.. 3. Pó de rocha. 4. Coproduto.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A presente pesquisa destaca vários benefícios potenciais do uso do agromineral silicático no cultivo do arroz de terras altas, a partir de uma perspectiva de produção mais sustentável, melhorando a fertilidade do solo, liberando gradualmente nutrientes e reduzindo potencialmente a necessidade de aplicações de fertilizantes minerais convencionais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The present research highlights several potential benefits of using silicate agromineral in upland rice cultivation, from a sustainable production perspective, improving soil fertility, gradually releasing nutrients, and potentially reducing the need for applications of conventional mineral fertilizers.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AGROMINERAL SILICÁTICO NA CULTURA DO ARROZ COMO FONTE DE SILÍCIO E REMINERALIZADOR DE SOLOS

AUTORA: MARIANA DE CARVALHO RIBEIRO

ORIENTADOR: THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA
Data: 18/12/2024 11:12:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciencia do Solo / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP

Documento assinado digitalmente
gov.br
NERICLENES CHAVES MARCANTE
Data: 18/12/2024 17:15:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. NERICLENES CHAVES MARCANTE (Participaçao Virtual)
Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento / Mineragro Pesquisa Agronômica

Documento assinado digitalmente
gov.br
LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA
Data: 18/12/2024 11:46:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciencias Agronomicas - UNESP

Ilha Solteira, 18 de dezembro de 2024

Dedico este trabalho à minha mãe, Ivani de Carvalho, e à minha tia, Célia Regina de Carvalho, por sempre me incentivarem, impulsionarem e apoiarem financeiramente meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre comigo, me conduzindo e direcionando, pelo fôlego de vida e sabedoria que me permitem alcançar meus sonhos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, pela parceria e orientação ao longo desses anos, por acreditar em mim e confiar este trabalho à minha responsabilidade, dedicando seu tempo e compartilhando seus valiosos ensinamentos.

Aos meus familiares e meu namorado, que estão sempre ao meu lado, me incentivando, ajudando e sonhando comigo.

Aos colegas do Grupo de Estudos em Nutrição, Adubação e Fertilidade do Solo (GENAFERT), por me apoiarem no desenvolvimento desta pesquisa.

À Profa. Dra. Aline Redondo Martins e à doutoranda Patrícia Rosalem, por estarem sempre disponíveis a me ajudar e compartilhar seus conhecimentos em Morfologia Vegetal.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira, pelo ambiente de aprendizado de alta qualidade oferecido aos alunos, o que foi fundamental para meu desenvolvimento científico e profissional.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Agronomia da FEIS/UNESP, pelo conhecimento compartilhado, pelo apoio científico e por todo o suporte prestado, sendo essenciais para a conclusão do mestrado.

Aos professores Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho e Dr. Hamilton Seron Pereira, membros da minha banca de qualificação, por suas valiosas contribuições, que enriqueceram o trabalho e ampliaram minha compreensão sobre ele. Também expresso minha gratidão aos membros da banca de defesa da dissertação, Dr. Nericlenes Chaves Marcante e Dr. Luís Gustavo Frediani Lessa, pela dedicação, disponibilidade e pelas contribuições oferecidas.

Por fim, agradeço à CAPES pela oportunidade de desenvolver este trabalho com o apoio de recursos e bolsa de financiamento. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Os agrominerais silicáticos (AS) podem ser utilizados como remineralizantes do solo, fornecendo nutrientes às plantas. A sua utilização na agricultura pode minimizar a dependência de fertilizantes minerais convencionais (FMC). Objetivou-se, com esta pesquisa, avaliar o efeito residual da aplicação de AS “in natura” e seus benefícios como remineralizador do solo e fonte de nutrientes e silício (Si) para o cultivo de arroz de terras altas. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando delineamento de blocos casualizados. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 5 × 2 + 2, composto por cinco doses de AS (0; 7,5; 15; 30 e 60 t ha^{-1})(1) e dois solos (RQo: Neossolo Quartzarênico Órtico e LVd: Latossolo Vermelho Distrófico), além de dois tratamentos adicionais (aplicação de calcário e fertilizante mineral convencional). As plantas de arroz foram cultivadas em vasos com 5 kg de solo sob aplicação residual dos tratamentos. Foram avaliados a fertilidade do solo, teores de macro e micronutrientes no solo, o teor de Si disponível no solo, a produção de biomassa e o acúmulo de macro e micronutrientes nas raízes e parte aérea do arroz, bem como o acúmulo de Si na parte aérea, a anatomia do tecido vegetal e a densidade estomática das folhas de arroz. A aplicação residual de doses de AS reduziu a acidez potencial e a acidez trocável e aumentou o pH, a soma de bases, a saturação por bases, além dos teores de Ca, S e Si no solo. Tais melhorias foram observadas com a aplicação das doses de 46 e 29 t ha^{-1} de AS no RQo e no LVd, respectivamente. O uso de AS como remineralizador de solo apresenta uma solução sustentável para solos agrícolas de baixa fertilidade, particularmente em países tropicais altamente dependentes de FMC. Ao mitigar questões ambientais e socioeconómicas, a sua aplicação contribui para a reutilização de subprodutos mineiros e melhora a produção agrícola e a segurança alimentar.

Palavras-chave: agricultura regenerativa; *Oryza sativa* L.; pó de rocha; coproduto.

(1) Será utilizado ponto como separador decimal sobre a linha conforme o Sistema Internacional de Unidades (2012).

ABSTRACT

The silicate agrominerals (SA) can be used as soil remineralizers, providing plant nutrients. Their use in agriculture can minimize dependence on conventional mineral fertilizers (CMF). In this study, we evaluated the residual effects of SA application including its benefits as a soil remineralizer and source of nutrients and silicon (Si) for upland rice cultivation. The experiment was conducted in pots in a greenhouse, using a randomized complete block design. The treatments were arranged in a 5 × 2 + 2 factorial scheme, consisting of five rates of SA (0; 7.5; 15; 30, and 60 Mg ha^{-1}) and two soils (TQ: Typic Quartzipsamment and RH: Rhodic Hapludox), in addition to two additional treatments (lime and CMF). Rice plants were grown in pots with 5 kg of soil under residual application of treatments. Soil fertility, macro and micronutrient concentration in the soil, available Si concentration in the soil, biomass production, and accumulation of macro and micronutrients in the roots and shoots of rice, as well as the accumulation of Si in shoots, the anatomy of plant tissue, and the stomatal density of rice leaves. The residual application of SA rates reduced potential acidity and exchangeable acidity and increased pH, sum of bases, base saturation, Ca, S, and Si. Such improvements were observed with SA rates of 46 Mg ha^{-1} and 29 Mg ha^{-1} for TQ and RH, respectively. The use of SA as a soil remineralizer presents a sustainable solution for low fertility agricultural soils, particularly in highly CMF-dependent tropical countries. By mitigating environmental and socioeconomic issues, its application contributes to the reuse of mining by-products and enhances agricultural production and food security.

Keywords: regenerative agriculture; *Oryza sativa* L.; rock dust; by-product.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Valores de matéria orgânica – MO (a) (valor médio para ambos os solos), pH (b), acidez potencial – H+Al (c) e trocável – Al (d) obtidos no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) 35
Figura 2 – Valores de soma de base – SB (a), capacidade de troca catiônica – CTC (b) (valor médio para ambos os solos) e saturação por bases – V (c) obtidos no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS).....36
Figura 3 – Teores disponíveis de fósforo – P (a), potássio – K (b), cálcio – Ca (c) e enxofre – S (d) (valor médio para ambos os solos) no solo, após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd).....39
Figura 4 – Teores disponíveis de boro – B (a), cobre – Cu (b), ferro – Fe (c) (valor médio para ambos os solos) e manganês – Mn (d) no solo, após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd).....42
Figura 5 – Teores disponíveis de silício (Si) no solo, após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 44
Figura 6 – Acúmulo de enxofre (S) na parte aérea das plantas de arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 48
Figura 7 – Acúmulo de cobre – Cu (a), manganês – Mn (b) (valor médio para ambos os solos) e zinco – Zn (c) (valor médio para ambos os solos) na parte aérea das plantas de arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 51

Figura 8 – Teor de silício (Si) na parte aérea da cultura do arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 53
Figura 9 – Acúmulo de nitrogênio – N (a) e magnésio - Mg (b) (valor médio para ambos os solos) nas raízes das plantas de arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 56
Figura 10 – Acúmulo de boro – B (a) (valor médio para ambos os solos) e zinco - Zn (b) (valor médio para ambos os solos) nas raízes das plantas de arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 59
Figura 11 – Secções transversais de folhas de arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) em função da aplicação de doses (0, 30 e 60 t ha^{-1}) de agromineral silicático (AS), como indicados lateralmente às imagens. a.b.e.f.i.j. mostrando a nervura central. c.d.g.h.k.l. mostrando área laminar da folha. st = estômato, abe = epiderme abaxial, ade = epiderme adaxial, p = parênquima, bc = célula buliforme, Ar = aerênquima, vb = feixe vascular.....64
Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura, da superfície foliar do arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado em um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) em função da aplicação de doses (0, 30 e 60 t ha^{-1}) de agromineral silicático (AS), como indicados lateralmente às imagens. a.e.i.m.q.u. visão ampla da epiderme adaxial; b.f.j.n.r.v. mostrando detalhe dos estômatos da epiderme adaxial. c.g.k.o.s.w. visão ampla da epiderme abaxial; d.h.l.p.t.x. mostrando detalhe dos estômatos da epiderme abaxial. As imagens b.l.v. estão indicando papilas que são possíveis de se encontrar em todas as imagens.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos[1] e físicos[2] das amostras dos solos utilizadas no experimento (Média ± desvio-padrão; *n* = 3).....25
Tabela 2 – Efeito dos tratamentos na matéria orgânica (MO), acidez ativa (pH), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) após o cultivo de plantas de arroz no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 34
Tabela 3 – Efeito dos tratamentos nos teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) no solo[3] após o cultivo de plantas de arroz no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 38
Tabela 4 – Efeito dos tratamentos nos teores de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) no solo[3] após o cultivo de plantas de arroz no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 41
Tabela 5 – Efeito dos tratamentos no teor de silício (Si) no solo[3] após o cultivo de plantas de arroz no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd).....43
Tabela 6 – Efeito dos tratamentos na altura das plantas (AP), índice de clorofila foliar (ICF), matéria seca da parte aérea (MSPA) e raízes (MSR) aos 80 dias após a emergência (DAE) das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 45
Tabela 7 – Efeito dos tratamentos nos acúmulos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na parte aérea das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd).....47
Tabela 8 – Efeito dos tratamentos nos acúmulos de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) na parte aérea das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico(RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd).....50
Tabela 9 – Efeito dos tratamentos no teor e acúmulo de silício (Si) na parte aérea das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 52
Tabela 10 – Efeito dos tratamentos nos acúmulos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nas raízes das plantas de arroz

cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd).....55
Tabela 11 – Efeito dos tratamentos nos acúmulos de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas raízes das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 58
Tabela 12 – Efeito dos tratamentos na espessura dos componentes da anatomia foliar do arroz cultivado no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd).....61
Tabela 13 – Efeito dos tratamentos na espessura da nervura central e do aerênquima e no número de feixe vascular da folha arroz cultivado no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd).....63
Tabela 14 – Efeito dos tratamentos na densidade estomática das epidermes adaxial e abaxial da folha de arroz cultivado no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) 63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Altura de planta
AS	Agromineral silicático
C	Calagem
CTC	Capacidade de troca catiônica
CV	Coeficiente de variação
DAE	Dias após a emergência
DTPA	Ácido Dietilenotriaminopentaacético
EAA	Espectrofotometria de absorção atômica
FMC	Fertilizante mineral convencional
ICF	Índice de Clorofila Foliar
LVd	Latossolo Vermelho Distrófico
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Matéria orgânica
MSPA	Matéria seca da parte aérea
MSR	Matéria seca das raízes
pH	Potencial hidrogeniônico
PNF	Plano Nacional de Fertilizantes
RQo	Neossolo Quartzarênico Órtico
SB	Soma de bases
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
USDA	United States Department of Agriculture
V	Saturação por bases

LISTA DE SÍMBOLOS

As	Arsênio
B	Boro
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Cu	Cobre
°C	Grau Celsius
dm^{-3}	Decímetro cúbico
Fe	Ferro
g	Grama
ha	Hectare
Hg	Mercúrio
kg	Quilograma
kV	Quilovolts
L	Litro
m	Metro
min	Minuto
mg	Miligrama
mL	Mililitro
mm^2	Milímetro quadrado
$mmol_c$	Milimol-carga
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
nm	Nanômetro
nº	Número
NS	Não Significativo
P	Fósforo
Pb	Chumbo
S	Enxofre
UV-VIS	Ultravioleta e Visível
Zn	Zinco
µg	Micrograma

µm	Micrômetro
*	Asterisco (significância em $p \leq 0.05$)
**	Dois asteriscos (significância em $p \leq 0.01$)
%	Porcentagem
•	Círculo (estatisticamente igual ao tratamento contraste)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
2 REVISÃO DE LITERATURA 20
3 MATERIAL E MÉTODOS 24
3.1 ATRIBUTOS DOS SOLOS 24
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGROMINERAL SILICÁTICO 24
3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS 25
3.4 VARIÁVEIS ANALISADAS 27
3.4.1 Solo 27
3.4.2 Planta 28
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA 31
4 RESULTADOS 32
4.1 SOLO 32
4.2 PLANTA 44
5 DISCUSSÃO 66
6 CONCLUSÃO 71
REFERÊNCIAS 72
APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO AGROMINERAL SILICÁTICO REALIZADA PELO LABORATÓRIO CRTI 83
APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DO AGROMINERAL SILICÁTICO 83

1 INTRODUÇÃO

Os agrominerais são derivados de matérias-primas de origem mineral, como recursos geológicos (também conhecidos como “pó de rocha”) e/ou subprodutos relacionados (Cardozo *et al.*, 2024). Os agrominerais silicáticos (AS) “in natura” são minerais de ocorrência natural, ricos em sílica, ganharam atenção significativa nos últimos anos devido: *i*) ao seu potencial para mitigar os impactos ambientais relacionados ao uso de fertilizantes minerais convencionais (FMC) na agricultura; *ii*) melhorar a saúde do solo e a produtividade das culturas (Bicca *et al.*, 2023). Podem ser aplicados no solo após uma simples redução de tamanho por meio de processos mecânicos, servindo como fontes alternativas de nutrientes na agricultura, complementando o FMC (Medeiros *et al.*, 2021).

O arroz (*Oryza sativa* L.), um alimento básico para milhares de milhões de pessoas em todo o mundo, desempenha um papel fundamental na segurança alimentar global. O seu cultivo é particularmente significativo em regiões com elevada densidade populacional e com limitação de terras aráveis, como a Ásia e a América do Sul (Bin Rahman; Zhang, 2023). O Brasil, um grande exportador agrícola, testemunhou um aumento substancial na produção de arroz (de terras altas e de terras baixas) nas últimas décadas, impulsionado por avanços tecnológicos e condições climáticas favoráveis. Em 2023, o Brasil produziu cerca de 11.2 milhões de toneladas de arroz, tornando-se o maior produtor e consumidor de arroz fora da Ásia (Durand-Morat; Bairagi; Mulimbi, 2023).

A utilização de fertilizantes minerais tem sido fundamental para aumentar a produtividade do arroz, bem como de todos os outros produtos exportados para todo o mundo, especialmente para um país, como o Brasil, que é caracterizado por uma presença generalizada de solos de baixa fertilidade. Na verdade, os solos tropicais brasileiros originam-se de uma história muito longa de processos de intemperismo, com fenômenos de lixiviação natural intensificados, levando à presença generalizada de solos distróficos, caracterizados por baixa fertilidade e disponibilidade restrita de nutrientes para as culturas (Nogueira *et al.*, 2018). Por isso que o Brasil é o quarto maior consumidor global de fertilizantes e um dos maiores importadores mundiais de fertilizantes, com uma dependência de aproximadamente 85% do total utilizado no país, destacando a dependência da oferta interna do mercado externo (PNF, 2021).

No entanto, as flutuações na oferta e nos custos de fertilizantes causadas por políticas governamentais, crises sanitárias e ambientais e conflitos geopolíticos, entre outras questões relacionadas aos países exportadores de fertilizantes (Abay *et al.*, 2023), causam variações nos custos de produção, alterando o planejamento agrícola e, consequentemente, comprometendo a segurança alimentar global (Urak *et al.*, 2024). Além disso, a grande utilização de FMC provoca crescentes preocupações socioeconómicas e ambientais. Portanto, é necessário investigar fontes alternativas para manter a fertilidade do solo, promover o desenvolvimento das culturas e contribuir para a preservação ambiental, para uma agricultura cada vez mais sustentável (Cardozo *et al.*, 2024).

A procura por fontes de nutrientes que contribuam para a produção de alimentos com qualidade nutricional (Ramos *et al.*, 2022), de baixo impacto ambiental (Mbissik *et al.*, 2021), bem como promovam o sequestro de carbono (Beerling *et al.*, 2020; Kelemen *et al.*, 2020; Kelland *et al.*, 2020) e a recuperação de áreas degradadas (Theodoro *et al.*, 2021) justificam o uso de AS na agricultura. Além disso, seu uso tem sido incentivado pelo governo brasileiro por meio do Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) (PNF, 2021), visando reduzir a dependência externa do país e atender entre 45% e 50% da demanda interna até 2050. No entanto, o uso de agrominerais na agricultura não deve ter como objetivo substituir os fertilizantes minerais por remineralizadores, mas propor mudanças no conceito de gestão da fertilidade em agroecossistemas tropicais com solos naturalmente pouco férteis (Lefebvre *et al.*, 2019), visando otimizar a gestão de nutrientes na agricultura e sistemas de produção.

Sabe-se que o AS melhora a fertilidade do solo, fornecendo nutrientes como Ca, Mg e K, além de Si (Dalmora *et al.*, 2020). Quando incorporado ao solo, o AS também proporciona benefícios à física do solo, como maior agregação, aumento da retenção de água e aeração (Zhang; Gadd; Li, 2021). Essas alterações promovem melhorias na estrutura do solo, estimulam a atividade biológica e criam um ambiente favorável ao crescimento das raízes, resultando em uma vegetação mais vigorosa (Zhang; Gadd; Li, 2021). Embora alguns efeitos benéficos do AS já sejam conhecidos, ainda falta conhecimento científico de sua recomendação como fonte de nutrientes e/ou condicionadores de solo para a agricultura (Embrapa, 2020).
A escassez de informações científicas sobre AS pode ser atribuída à complexidade inerente ao número de fatores que influenciam sua eficiência, como origem,

mineralogia, composição química, características do solo, tempo de incubação no solo e espécies cultivadas (Silva *et al.*, 2014).

Com base no exposto, este estudo leva em consideração a hipótese de que o efeito residual das doses de um AS pode melhorar a fertilidade do solo, atendendo às necessidades nutricionais, proporcionando maior disponibilidade e acúmulo de Si, além de beneficiar o desenvolvimento das plantas, principalmente devido a alterações na anatomia foliar de arroz; uma espécie acumuladora de Si (Ma; Miyake; Takahashi, 2001). Assim, objetivou-se avaliar o efeito residual de aplicações de doses de AS como fonte de Si e remineralizador de solo, explorando solos tropicais com propriedades físicas e químicas contrastantes, cultivados com arroz de terras altas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nos últimos 100 anos, a agricultura brasileira experimentou grande desenvolvimento, obtendo recordes de produtividade em diversas culturas, deixando de ser um grande importador de alimentos e tornou um dos maiores exportadores mundiais, sendo conhecido como o “celeiro do mundo” (Vieira Filho *et al.*, 2016). O agronegócio brasileiro desempenha um papel fundamental na segurança alimentar global e também na economia nacional, com grande participação no Produto Interno Bruto (PIB); todavia, o PIB do agronegócio vem acumulando retração 3.5% em 2024, principalmente pela redução da produção de importantes produtos do setor (CNA; CEPEA, 2024). Um dos fatores que elevam os custos da produção agrícola e contribuem para essa queda é a importação de fertilizantes agrícolas, que representa um dos itens principais no orçamento do produtor (CONAB, 2021).

Devido ao alto processo de intemperismo que ocorre no Brasil e ao elevado índice pluviométrico de grande parte das regiões, seus solos são considerados, em sua maioria, de baixa fertilidade natural e de elevada acidez, sendo necessária a reposição dos nutrientes no solo via adubação, em função da exportação de nutrientes pelas culturas e elevar o pH por meio de métodos de correção da acidez do solo, para se obter uma produção considerável das culturas agrícolas (Souza, 2019). Entretanto, o mercado interno brasileiro, está longe de suprir toda a demanda em relação aos fertilizantes. Logo, para que se aumente a autonomia brasileira no abastecimento de nutrientes para suas lavouras serão necessários investimentos em tecnologias e novos produtos, a fim de complementar a aplicação dos fertilizantes convencionais.

Nesse contexto, uma tendência é a busca por novas fontes de nutrientes, provenientes de agrominerais nacionais. Esses materiais foram enquadrados, segunda a Lei Nº 12.890, como remineralizadores de solos, por sofrerem apenas redução e classificação de tamanho de partículas por processos mecânicos e tendo efeitos, quando aplicados ao solo, na fertilidade, por meio do fornecimento de macro e micronutrientes para as plantas e na melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo (Brasil, 2013). Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), já existem 82 empresas produtoras de remineralizadores com registro ativo para comercialização desses (MAPA, 2023).

A geodiversidade brasileira propicia a mineração de uma ampla gama de substâncias, contudo, um dos desafios do setor é a geração de rejeitos sem valor econômico associado. Assim sendo, os agrominerais como insumo agrícola promove uma destinação adequada aos rejeitos da mineração e transformando-os em coprodutos. As rochas mais adequadas para remineralização de solos são as vulcânicas, como basaltos, andesitos e dacitos, devido ao seu menor teor de silicá livre (quartzo) e, portanto, maior suscetibilidade ao biointemperismo (Cardozo *et al.*, 2024).

A eficiência limitada dos fertilizantes solúveis em solos de condições tropicais, onde a interação de fatores do solo, devido à baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e do clima, em virtude da alta pluviosidade tornam os nutrientes advindos dos fertilizantes solúveis mais suscetíveis à lixiviação (Tamfuh *et al.*, 2019), faz com que a baixa solubilidade dos agrominerais se torne uma vantagem para a agricultura tropical promovendo efeitos residuais em cultivos sucessivos, elevando a CTC resultante da formação de minerais secundários e minimizando as perdas por lixiviação dos nutrientes na solução do solo (Swoboda; Döring; Hamer, 2022). À medida que os minerais da rocha são intemperizados, os nutrientes são disponibilizados ocasionando um rejuvenescimento do solo (BRITO *et al.*, 2019).

A baixa solubilidade dos agrominerais garante também que não ocorrerá contaminação do solo e corpos hídricos pelo excesso da oferta de nutriente como acontece quando se utiliza formulações NPK, onde o nitrogênio (N) libera óxido nitroso, colaborando com o efeito estufa; o fósforo (P) é retido nas estruturas de argilas ricas em alumínio e o potássio (K) não utilizado pelas plantas é lixiviado para os rios, contaminado os recursos hídricos (Theodoro; Leonardos, 2011).

Ao passo que a maioria dos fertilizantes comerciais contêm apenas os três macronutrientes principais (N, P e K), as rochas disponibilizam uma variedade de macro e micronutrientes por serem compostas por vários minerais como biotita, flogopita, feldspatos, feldspatoides, minerais máficos (Silva *et al.*, 2012; Toscani; Campos, 2017). Assim, combinando a carência do solo com a mineralogia e geoquímica da rocha obtém-se maior eficiência da rochagem, visto que ocorrerá a liberação de nutrientes a curto, médio e longo prazo (Alovisi *et al.*, 2017).

Pesquisas evidenciaram que a eficiência agronômica dos agrominerais depende da sua origem, mineralogia e composição química, assim como de fatores

relacionados as características do solo, do tempo de incubação do agromineral e das espécies cultivadas (Nascimento; Loureiro, 2004; Silva *et al.*, 2012, 2014). Doses baixas de agromineral podem não ter efeito agronômico, enquanto altas doses podem ser inviáveis financeiramente, devido ao transporte desses materiais por longas distâncias. Logo, a distância entre os centros produtores e as regiões agrícolas é um fator decisivo para a viabilidade econômica.

As respostas agronômicas dos agrominerais aplicados como fonte de nutrientes são semelhantes às encontradas com fertilizantes solúveis (Aguilera *et al.*, 2020; Manning *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017). Podendo ser uma fonte alternativa de potássio (K) para as culturas (Mohammed *et al.*, 2014; Nogueira *et al.*, 2021), aumentando os teores de fósforo (P), cálcio (Ca), e magnésio (Mg) ao longo do tempo (Theodoro *et al.*, 2013), reduzindo a disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos e de alumínio (Ramos *et al.*, 2017).

O uso dos agrominerais no solo não só contribui para a produção de alimentos mais sustentáveis, como também está em conformidade com os princípios dos objetivos 2 e 12 da ‘Agenda 2030’ da ‘Organização das Nações Unidas’ (ONU) para promover os ‘17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável’ (ODS), que consideram acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável, e assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis (ONU, 2015).

Na crosta terrestre, o Si é o segundo elemento mais abundante (Brackhage *et al.*, 2013). Contudo, a alta quantidade de Si no solo não indica alta disponibilidade para as plantas. O ácido monossilícico (H_4SiO_4) é a forma de Si disponível na solução do solo e absorvida pelas plantas (Katz *et al.*, 2021). Na seiva do xilema, essa forma permanece a mesma, atingindo às folhas pelo gradiente de transpiração (Mitani-Ueno; MA, 2021). A concentração de ácido monossilícico, na solução do solo, pode variar, sofrendo alteração pelo teor de argila do solo, matéria orgânica, pH, minerais e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Tubaña; Heckman, 2015).

Solos de menor qualidade em fertilidade impactam diretamente na produção de alimentos, visto que reduzem o potencial produtivo das culturas (Greger; Landberg; Vaculík, 2018). A aplicação de fertilizantes silicatados tem sido amplamente discutida para viabilizar o uso desses solos, já que o Si propicia, às plantas, maior tolerância à deficiência hídrica e à salinidade, diminui a taxa respiratória foliar e a absorção de

elementos tóxicos, bem como aumenta a disponibilidade de nutrientes e a resistência mecânica à penetração de patógenos (Yan *et al.*, 2018), promovendo maior estabilidade na produção das culturas.

Experimentos de campo realizados na China, com o cultivo de arroz em diferentes solos, concluíram que a adição de subprodutos de origem mineral a base de Si, como escória de siderurgia, aumentou a produção da cultura em 3.5 a 28.5% (Liang *et al.*, 2015). Além de ganhos de produtividade, a deposição de Si como sílica amorfa na parede celular mantém as plantas mais eretas, melhorando a interceptação de luz e, por conseguinte, a eficiência fotossintética, reduz doenças bióticas e abióticas (Guntzer; Keller; Meunier, 2012; Savvas; Ntatsi, 2015) e propicia a biossíntese de quantidades consideráveis de compostos de defesa orgânica (Epstein, 2009; Haynes, 2014).

Ainda que o Si desempenhe diversas funções nas plantas e que sua concentração nos tecidos muitas vezes se iguale a de macronutrientes, é considerado um elemento benéfico (Epstein, 2009). O Si eleva o rendimento de algumas espécies cultivadas, pois aperfeiçoa alguns aspectos morfofisiológicos e processos bioquímicos, devido ao acúmulo e polimerização de silicatos em células epidérmicas promovendo o desenvolvimento de uma dupla camada conhecida como silício-cutícula que diminui a transpiração, resultando em um menor consumo de água (Peixoto *et al.*, 2011). O Si também influencia uma resposta osmorregulatória, alterando o conteúdo de prolina que ajusta a condutividade hidráulica da raiz (Avila *et al.*, 2021) e estimula a atividade da aquaporina (Abbas *et al.*, 2015), contribuindo para o aumento da absorção de água.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ATRIBUTOS DOS SOLOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no município de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil (20º25'S 51º20'W), por 220 dias, sendo 60 dias utilizados para a incubação do AS em doses e solos contrastantes, 50 dias para o cultivo da cultura do sorgo nos solos incubados (cultivo antecessor ao arroz), 30 dias de intervalo entre a colheita do sorgo e a semeadura do arroz e 80 dias para o cultivo do arroz, contados a partir do início da emergência das plântulas.

Os solos foram coletados na camada de 0 a 0.2 m de profundidade, sendo classificados como Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) (Santos *et al.*, 2018), correspondentes aos Typic Quartzipsamment e Rhodic Hapludox, respectivamente (USDA, 2022). Depois de coletadas, as amostras de solo foram secas ao ar, passadas em peneira de 4 mm de abertura de malha. Subamostras, denominadas de terra fina seca ao ar, foram coletadas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas e os atributos químicos (RAIJ *et al.*, 2001) e físicos (Teixeira *et al.*, 2017) desses solos estão descritos na Tabela 1.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGROMINERAL SILICÁTICO

Os agrominerais silicáticos são provenientes de uma região mineradora em Monções, no Estado de São Paulo. Essa área abrange as Bacias Sedimentares do Paraná e Bauru, reconhecidas como locais estratégicos para a produção e comercialização de agrominerais silicáticos (Silva, 2024).

Para avaliação do AS como possível remineralizador de solos, foi realizada a caracterização mineralógica (Apêndice A), granulométrica (Apêndice B) e química conforme estabelecido pelo MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) (MAPA, 2016). O AS, advindo de uma rocha basáltica, é constituído por 49.86% de SiO_2, 12.63% de Al_2O_3, 13.80% de Fe_2O_3, 10.56% de CaO, 5.67% de MgO, 2.29% de Na_2O, 1.40% de K_2O, 0.22% de MnO, 0.30% de P_2O_5 e 1.89% de TiO_2. Portanto, o AS cumpre os critérios mínimos no que se refere a soma de bases ser igual ou superior a 9% e o valor de óxido de potássio (K_2O) igual ou superior a 1%

(MAPA, 2016). Os elementos potencialmente tóxicos encontram-se em teores inferiores a 1.0 mg kg^{-1} para os elementos arsênio (As), cádmio (Cd) e chumbo (Pb), e abaixo de 0.1 mg kg^{-1} para o mercúrio (Hg). Assim, todos os teores estão abaixo dos limites máximos permitidos (As = < 15 mg kg^{-1}; Cd = < 10 mg kg^{-1}; Pb = < 200 mg kg^{-1} e Hg = < 0.1 mg kg^{-1}) (MAPA, 2016).

Tabela 1 - Atributos químicos[(1)] e físicos[(2)] das amostras dos solos utilizadas no experimento (Média ± desvio-padrão; *n* = 3)

Atributos	**Unidade**	**Solos**	
		RQo	**LVd**
pH ($CaCl_2$)	-	4.4 ± 0.0	3.9 ± 0.0
Matéria orgânica	g dm^{-3}	12 ± 0.0	13 ± 0.0
P	mg dm^{-3}	2 ± 0.0	3 ± 0.0
K	$mmol_c$ dm^{-3}	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1
Ca	$mmol_c$ dm^{-3}	3 ± 0.0	1 ± 0.5
Mg	$mmol_c$ dm^{-3}	3 ± 0.6	1 ± 0.0
Alumínio	$mmol_c$ dm^{-3}	4 ± 0.6	11 ± 1.0
H+Al	$mmol_c$ dm^{-3}	25 ± 0.0	36 ± 2.3
SB	$mmol_c$ dm^{-3}	6.4 ± 0.6	2.3 ± 0.5
S-SO_4	mg dm^{-3}	5 ± 0.6	4 ± 0.6
CTC	$mmol_c$ dm^{-3}	31.4 ± 0.6	38.3 ± 1.8
V	%	20 ± 1.7	6 ± 1.7
B	mg dm^{-3}	0.10 ± 0.0	0.18 ± 0.1
Cu (DTPA)	mg dm^{-3}	1.4 ± 0.1	0.9 ± 0.1
Fe (DTPA)	mg dm^{-3}	24 ± 1.0	24 ± 1.0
Mn (DTPA)	mg dm^{-3}	3.5 ± 0.2	7.2 ± 3.1
Zn (DTPA)	mg dm^{-3}	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.1
Silício	mg kg^{-1}	2.91 ± 0.1	2.11 ± 0.5
Areia (> 0.05 mm)	g kg^{-1}	774 ± 5.1	675 ± 3.2
Silte (> 0.002 e < 0.05 mm)	g kg^{-1}	35 ± 6.6	63 ± 4.0
Argila (< 0.002 mm)	g kg^{-1}	191 ± 2.6	262 ± 4.3

[(1)]Raij *et al*. (2001). [(2)]Teixeira *et al*. (2017). RQo = Neossolo Quartzarênico Órtico. LVd = Latossolo Vermelho Distrófico. SB = Soma de bases. CTC = Capacidade de troca catiônica. V = Saturação por bases.
Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

As unidades experimentais foram constituídas por vasos de polietileno preenchidos com 5 kg de solo (RQo e LVd). Os tratamentos foram originados do esquema fatorial 5 x 2 + 2, sendo: cinco doses de AS (0; 7.5; 15; 30 e 60 t ha^{-1}) e dois

solos (textura arenosa – RQo e textura média – LVd), além de dois tratamentos adicionais: *1)* RQo = aplicação de calcário + fertilizante mineral convencional (C + FMC), sem aplicação de AS e *2)* LVd = C + FMC, sem aplicação de AS. Os tratamentos com AS não receberam aplicação de calcário. Nos tratamentos adicionais, elevou-se a saturação por bases (V) para 60% (Cantarella *et al.*, 2022). Assim sendo, foram empregadas misturas de $CaCO_3$ e de $MgCO_3$, na forma de calcário agrícola (PRNT = 90%), mantendo a relação Ca:Mg de 3:1, sendo aplicados 2.77 g de calcário agrícola nos vasos contendo solos RQo e 4.32 g nos vasos contendo solos LVd.

As amostras de terra foram homogeneizadas após a aplicação do AS e do material corretivo, condicionadas em sacos plásticos e permaneceram incubadas por 60 dias. Durante esse período, os solos foram mantidos com o teor de umidade em cerca de 70% da sua capacidade de retenção de água, permitindo as trocas gasosas do solo, mantendo a microbiologia do solo ativa e ajudando na liberação dos nutrientes do AS. Posteriormente à incubação, foi realizado o cultivo do sorgo, por 50 dias. Como adubação de pré-semeadura, foi aplicado 100 mg kg^{-1} de N (sulfato de amônio), 50 mg kg^{-1} de P (monoamônio fosfato) e 70 mg kg^{-1} de K (cloreto de potássio) (Malavolta, 1980). Seis sementes de sorgo – *Sorghum bicolor* (cv. Agroceres Volumax) foram semeadas por vaso e, após nove dias da emergência das plântulas (DAE), foi realizado o desbaste, deixando duas plantas por vaso. Aos 10 DAE, foi aplicada uma solução de micronutrientes (0.5 mg kg^{-1} de B como ácido bórico, 2.0 mg kg^{-1} de Cu como sulfato de cobre, 4.0 mg kg^{-1} de Zn como sulfato de zinco e 3.0 mg kg^{-1} de Mn como sulfato de manganês) (Malavolta, 1980). Aos 20 DAE, foi aplicada uma solução nitrogenada (ureia como fonte de N), como complemento da recomendação utilizada inicialmente (Malavolta, 1980). Essas aplicações foram feitas em todos os tratamentos.

Após 30 dias da coleta das plantas de sorgo (dados não apresentados neste estudo), foi realizada a semeadura do arroz, cv. BRS A502. Seis sementes foram semeadas por vaso. Nove dias após de emergência (DAE) das plantas, foi realizado o desbaste, deixando-se quatro plantas por vaso. Como adubação de pré-semeadura, foi aplicado 100 mg kg^{-1} de N (sulfato de amônio), 150 mg kg^{-1} de P (monoamônio fosfato) e 50 mg kg^{-1} de K (cloreto de potássio) (Malavolta, 1980). Também foi aplicada uma solução de micronutrientes (0.5 mg kg^{-1} de B como ácido bórico, 2 mg kg^{-1} de Cu

como sulfato de cobre, 4 mg kg^{-1} de Zn como sulfato de zinco e 3 mg kg^{-1} de Mn como sulfato de manganês) (Malavolta, 1980) anterior à semeadura do arroz. Ao longo do cultivo, os vasos foram irrigados diariamente, mantendo a umidade do solo em 70% de capacidade de campo.

3.4 VARIÁVEIS ANALISADAS

3.4.1 Solo

Análises químicas: decorridos 220 dias de aplicação do AS, as amostras de terras, coletadas nos vasos após a retirada da parte aérea das plantas de arroz, foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, acondicionadas em sacos de polietileno, identificadas e armazenadas para a avaliação dos atributos químicos e nutrientes do solo conforme protocolos analíticos descritos em Raij *et al*. (2001).Os valores de pH foram determinados potenciometricamente em suspensões de terra fina seca ao ar (TFSA) em solução de $CaCl_2$ 0.01 mol L^{-1} na proporção solo-solução de 1:2.5. A matéria orgânica (MO) foi determinada após oxidação com $K_2Cr_2O_7$ em presença de H_2SO_4 e titulação do excesso de dicromato com a solução de $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$ 0.4 mol L^{-1}. O alumínio trocável (Al^{+3}) foi extraído com 1 mol L^{-1} e depois titulado com NaOH-0.025 mol L^{-1}. O cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) trocável foram extraídos por resina trocadora de íons e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica (EAA). O potássio (K^+) trocável e o fósforo (P) foram extraídos também por resina, sendo o K^+ determinado por fotometria de chama e o P por colorimetria. A acidez potencial (H+Al) foi estimada pelo método do pH SMP. O enxofre foi extraído por solução de $Ca(H_2PO_4)_2$ 0.01 mol L^{-1} e posterior medição da turbidez formada pela precipitação do sulfato pelo cloreto de bário, em colorimetria. Com esses resultados, foram calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7.0 e a saturação por bases (V). Os teores de Cu, Fe, Mn e Zn no solo foram extraídos usando a solução de DTPA em pH 7.3 (Abreu; Abreu; Andrade, 2001b), sendo procedida a determinação por EAA. O teor de B no solo foi avaliado por meio de extração com cloreto de bário, usando aquecimento com forno de micro-ondas e quantificado em espectrofotômetro UV-VIS a 420 nm (Abreu; Abreu; Andrade, 2001a).

Análise de silício: o teor de Si disponível no solo, após o cultivo do arroz, foi determinado conforme a metodologia descrita por Pereira e Korndörfer (2016). No pré-tratamento, as amostras de solo foram secas em estufa com circulação de ar forçado a 45 ºC até peso constante e, após isso, foram moídas manualmente. A extração do Si foi realizada com uma solução de cloreto de cálcio 0.01 mol L^{-1}. Foram pesados 10 g de solo acrescidos de 100 mL da solução extratora em frasco plástico (150 mL). Em seguida, foi agitada em agitador horizontal a 50 rpm por 1 hora. Após este período, foi necessário aguardar, por 15 min, a decantação do material e em seguida foi realizada a filtração da suspensão, repousando por uma noite (>12 horas). Para determinação das amostras, foi pipetada uma alíquota de 10 mL do extrato (filtrado/decantado) de cada amostra e foi colocado num becker ou copo de plástico de 50 mL. Para determinação dos padrões (0, 0.4; 1.0, 2.0 mg L^{-1} de Si), em balões de 100 mL, foram pipetados 0, 2, 5 e 10 mL da solução padrão de 20 mg L^{-1} de Si e o volume dos balões foi completado com água destilada. Foi retirada uma alíquota de 10 mL de cada padrão que foi transferida para um becker ou copo de plástico de 50 mL. Nos copos plásticos dos padrões e das amostras, foram acrescentados 1 mL da solução sulfo-molíbdica (H_4SiO_4 - ácido orto-silícico, forma mais simples e solúvel de Si, reage com o molibdato desenvolvendo a cor amarela) e, após 10 minutos, foram colocados 2 mL da solução de ácido tartárico 200 mg L^{-1} (utilizado para complexar o P da solução). Decorridos 5 minutos, foram adicionados 10 mL da solução de ácido ascórbico (a redução do Si transforma o complexo amarelo para a cor azul), e depois de 1 hora foi realizada a leitura em Espectrofotômetro UV-Visível no comprimento de onda de 660 nm.

3.4.2 Planta

Altura: com o auxílio de uma régua, aos 80 DAE das plantas de arroz, foram obtidas a altura das plantas (cm).

ICF: aos 80 DAE das plantas de arroz, foi avaliado o teor relativo de clorofila nas folhas (ICF), utilizando o clorofilômetro portátil Falker (clorofiLOG, modelo CFL 1030) (Falker, 2008), sendo realizado ao lado da nervura central das folhas bandeira, na face adaxial, sendo efetuada seis leituras.

Biomassa de raízes e parte aérea e análises químicas do tecido vegetal: Aos 80 DAE, as plantas de arroz foram cortadas rente ao solo. As amostras (parte aérea e raiz) foram lavadas em água corrente, acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa com circulação forçada de ar, mantida a 65 °C por 72 h. Após seco, todo o material foi pesado, para obtenção da massa da matéria seca da parte aérea e das raízes, moído em moinho tipo Willey para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997). Os acúmulos na parte aérea, bem como nas raízes (mg por planta) foram calculados com base nos teores dos nutrientes na parte aérea e raízes (g kg^{-1}) e massa da matéria seca da parte aérea e nas raízes (g por planta) de cada tratamento, respectivamente.

Análise de silício: os teores de Si nas amostras vegetais foram obtidos conforme protocolo analítico descrito por Pereira e Korndörfer (2016). Assim, para o processo de extração e digestão, foi pesado 0.1 g do material vegetal moído em tubos de polipropileno de 100 mL, acrescido de 2 mL de H_2O_2 (300 ou 500 g L^{-1}) com posterior agitação (agitador magnético) dentro da capela. Em seguida, foi adicionado 3 mL de NaOH (500 g L^{-1}) e, novamente, foi realizada a agitação. Com o intuito de reduzir a quantidade de espuma formada, foram adicionadas 3 gotas de octanol. Os tubos foram colocados em banho-maria por aproximadamente 1 hora. Assim que todas as amostras não estavam mais liberando gases, as bocas dos tubos foram cobertas com papel alumínio e os tubos foram acondicionados na autoclave por 1 hora à 253 ºF (123 ºC) e 1.5 atm. Nos materiais (tecido foliar) que não foram completamente digeridos, adicionou-se mais 2 mL de H_2O_2 (300 ou 500 g L^{-1}) e foram recolocados por mais 1 hora na autoclave. Após a digestão na autoclave, foi inserido 45 mL de água destilada. O extrato então foi transferido para frasco plástico identificado e ficou em repouso até que os resíduos se depositaram no fundo do tubo. A determinação foi realizada por meio do método azul (com bissulfito). Para as amostras, foram pipetada uma alíquota de 1 mL do sobrenadante do extrato em copo plástico de 50 mL, acrescida de 19 mL de água destilada, foi adicionado 1 mL HCl 20% (reagente A) em copinhos de 50 mL, agitando levemente. Em seguida foi adicionado 1 mL do reagente B (molibdato de amônio), agitando levemente por 5 minutos. Após esse período foi colocado 2 mL do reagente C (ácido tartárico 20%) e, após 3 minutos, 2 mL do

reagente D (ANSA). Decorridos 30 minutos foi realizada a leitura em espectrofotômetro a 630 ou 670 nm.

Análise anatômica do tecido vegetal: A microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV) foram realizados nos tratamentos que receberam o equivalente das doses de 0, 30 e 60 t ha^{-1} de AS. Amostras de folhas foram coletadas aos 50 DAE e fixadas em formaldeído, ácido acético e álcool 70% (Johansen, 1940). Após 48 h, o material vegetal foi armazenado em álcool 70%. Na folha completamente expandida, foi analisada a região mediana da folha, na nervura central e na área da lâmina foliar. As amostras foliares foram desidratadas em série etílica, incluídas em hidroxi-etil-metacrilato (Leica Historesin) e os blocos obtidos foram seccionados em micrótomo rotativo a 8 micrômetros de espessura. O material foi corado com azul de toluidina 0.05% em tampão fosfato e ácido cítrico pH 4.5 (Sakai, 1973) e as lâminas foram montadas em resina sintética “Entellan”. As fotomicrografias dos materiais preparados em lâminas foram feitas em microscópios óptico acoplado a câmera para obtenção de imagens, com as escalas micrométricas fotografadas e ampliadas nas mesmas condições ópticas utilizadas. As fotos foram submetidas ao software Digimizer para obtenção das medidas biométricas (espessura da epiderme adaxial, abaxial, parênquima, feixe vascular, células buliformes, nervura central, aerênquima, espessura total das folhas de arroz e o número de feixes vasculares). A MEV permitiu avaliação da densidade estomática das epidermes adaxial e abaxial Para tal, as amostras fixadas das folhas de arroz foram desidratadas em série etílica e secas ao ponto crítico do CO_2. Dentro da câmara, a expansão desse gás eleva a pressão, e esta sobe acima da pressão crítica de CO_2 (73 atm), e mantém a temperatura acima de 31 ºC, dessa forma, não há risco de liquefação do gás (Dedavid; Gomes; Machado, 2007). As amostras foram removidas secas da câmara, sem alteração da sua forma e foram fixadas em suporte de alumínio com fita dupla face de carbono e metalizadas com uma camada de ouro de 30–40 nm. As análises e a digitalização das imagens foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) Zeiss modelo EVO/LS15, operado a 20 kV com as escalas impressas diretamente nas eletromicrografias. A avaliação da densidade de estômatos foi realizada no aumento de 2500x, sendo feita a contagem de estômatos por mm^2.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($P \leq 0.05$), nos casos em que o teste F for significativo ($P \leq 0.05$) entre os tipos de solo. Também foi realizada a regressão polinomial para as interações significativas e/ou efeito das doses de AS para os parâmetros avaliados no solo e nas plantas. Ainda, por meio do teste de Dunnett ($P \leq 0.05$), foram verificadas as diferenças entres as doses do AS e os tratamentos adicionais. A análise estatística foi realizada utilizando os programas estatísticos R v.4.3.2, Team, USA, pacotes asbio, multcomp e ExpDes.pt (R Core Team, 2023) e AgroEstat (Barbosa; Maldonado Junior, 2015).

4 RESULTADOS

4.1 SOLO

Ao realizar a análise química do solo após os 220 dias, pôde-se observar que houve interação entre os solos e as doses de AS para pH, H+Al, Al, SB e V (Tabela 2). Notou-se também, influência das doses e dos solos para todos os atributos químicos. Sendo que, pH, SB e V apresentaram maiores valores quando as plantas foram cultivadas no solo de textura arenosa (RQo), enquanto a MO, H+Al, Al e CTC foram maiores no solo de textura média (LVd) (Tabela 2). De modo semelhante, para ambos os solos, verificou-se incremento nos valores de MO, pH, SB e V, e redução na acidez potencial (H+Al) e do alumínio quando comparado à caracterização química do solo inicial (Tabela 1).

Uma vez que os AS podem melhorar a fertilidade do solo, comparamos as doses de AS com a calagem mais o fertilizante mineral convencional (tratamento adicional). Assim, observamos que, para a MO, somente as doses de 30 e 60 t ha^{-1} do AS no solo RQo se diferiram do tratamento adicional, apresentando valores inferiores. Para os valores de pH, no solo RQo, a dose de 60 t ha^{-1} do AS foi similar ao tratamento adicional, e, no solo LVd, a dose de 30 t ha^{-1} (Tabela 2). Em relação a H+Al e a V, as doses de AS similares ao tratamento adicional foram as de 30 e 60 t ha^{-1} no RQo, e de 30 t ha^{-1} no LVd (Tabela 2). Todas as doses de AS, no RQo, se assemelharam ao tratamento adicional para o Al e a CTC, e no LVd, as de 30 e 60 t ha^{-1} para o Al, e exceto a de 60 t ha^{-1} para a CTC (Tabela 2). Para a SB, no RQo, as doses de 15, 30 e 60 t ha^{-1} se assemelharam ao tratamento adicional, e no LVd, as doses de 15 e 30 t ha^{-1} de AS (Tabela 2).

Em resposta à aplicação das doses de AS, para o atributo MO, houve ajuste linear decrescente, com valores que variaram de 13.88 a 12.50 g dm^{-3} (Figura 1a). O aumento das doses de AS promoveu efeitos significativos para os valores de pH, com ajuste linear crescente para ambos os solos, com valores que variaram de 5.78 a 6.68 no RQo, e de 4.63 a 5.93 no LVd (Figura. 1b). Além disso, o incremento das doses de AS, nos dois solos, reduziu linearmente a H+Al (Figura 1c). Os valores variaram de 18.00 a 11.00 $mmol_c\ dm^{-3}$ para o RQo, enquanto no LVd, a variação foi de 28.75 a 16.00 $mmol_c\ dm^{-3}$ (Figura 1c). O teor de Al também foi influenciado pelas

doses de AS no solo LVd, com ajuste linear decrescente, variando de 2.25 a 0.00 $mmol_c\ dm^{-3}$ (Figura 1d). Já no solo RQo, não houve ajuste aos modelos de regressão (Figura 1d).

Pôde-se observar, em ambos os solos, aumento linear para os atributos SB (Figura 2a). Os valores variaram de 25.80 a 38.05 $mmol_c\ dm^{-3}$ no RQo de SB, e de 16.80 a 40.10 $mmol_c\ dm^{-3}$ no LVd (Figura 2a). Em resposta à aplicação das doses de AS, houve aumento linear da CTC, com valores médios que variaram de 44.68 a 52.70 $mmol_c\ dm^{-3}$ (Figura 2b). Já para a V, também se notou aumento linear nos dois solos, variando de 55.93 a 77.17% no RQo, e, no LVd, de 36.85 a 71.45% (Figura 2c). Inicialmente, os valores de V desses solos eram de 20% para o RQo e de 6% para o LVd (Tabela 1). As maiores doses de AS promoveram um incremento de V em 57.17% no RQo e de 65.45% no LVd.

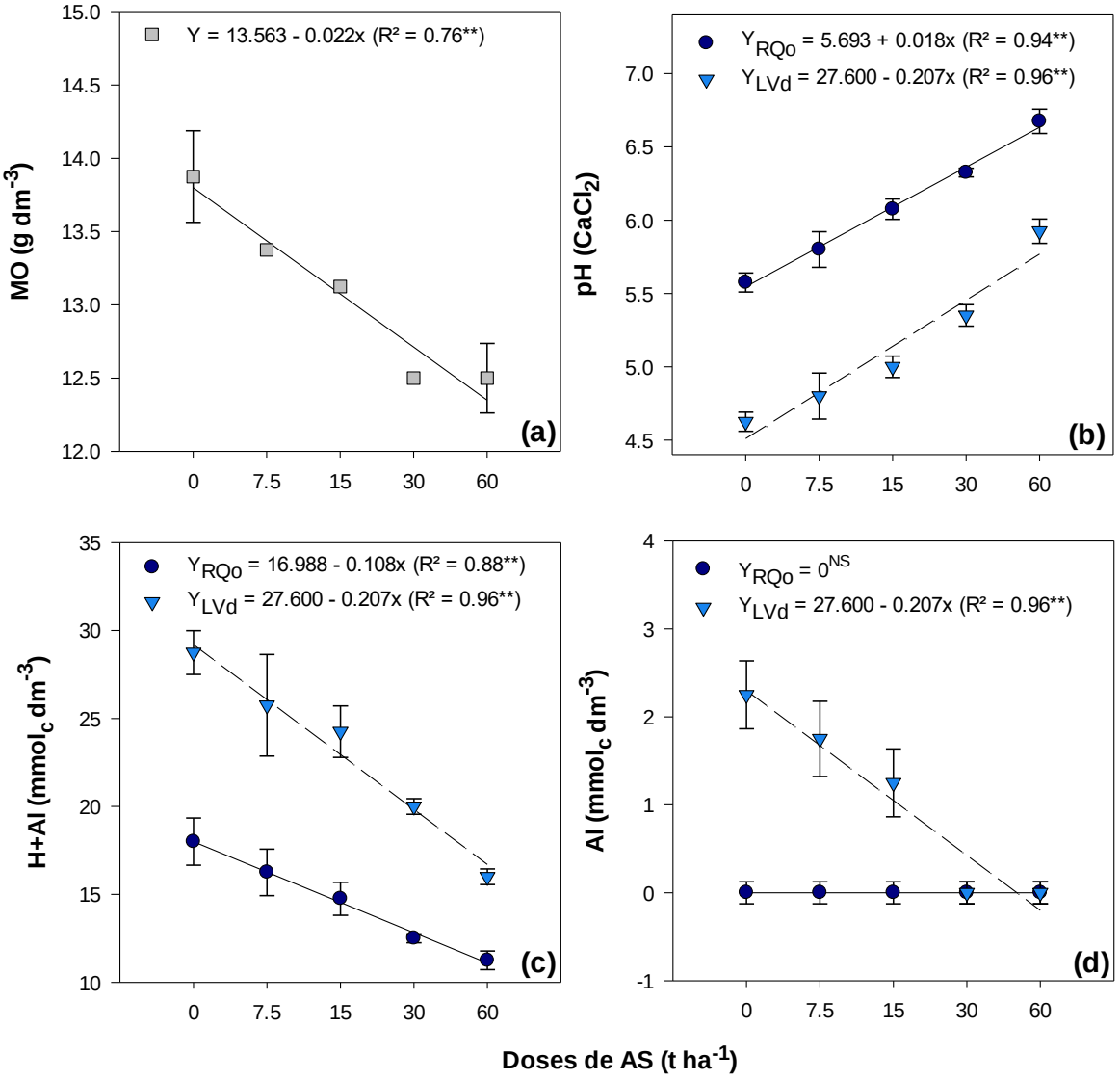
Tabela 2 - Efeito dos tratamentos na matéria orgânica (MO), acidez ativa (pH), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) após o cultivo de plantas de arroz no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamento	MO		pH_{CaCl2}		H+Al		Al		SB		CTC		V	
	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd
	g dm^{-3}				$mmol_c$ dm^{-3}								%	
C + FMC	13.25•	13.25•	6.60•	5.48•	12.00•	19.00•	0.00•	0.00•	37.83•	27.85•	49.83•	46.85•	75.76•	59.35•
Doses de AS (D)[1]														
0.0[2] t ha^{-1}	13.50•	14.25•	5.58	4.63	18.00	28.75	0.00•	2.25	25.80	16.80	43.80•	45.55•	58.93	36.85
7.5 t ha^{-1}	13.00•	13.75•	5.80	4.80	16.25	25.75	0.00•	1.75	30.10	20.10	46.35•	45.85•	64.76	43.95
15.0 t ha^{-1}	12.25•	14.00•	6.08	5.00	14.75	24.25	0.00•	1.25	30.85•	26.03•	45.60•	50.28•	67.67	51.62
30.0 t ha^{-1}	11.75	13.25•	6.33	5.35•	12.50•	20.00•	0.00•	0.00•	34.80•	27.58•	47.30•	47.58•	73.28•	57.95•
60.0 t ha^{-1}	11.75	13.25•	6.68•	5.93	11.25•	16.00	0.00•	0.00•	38.05•	40.10	49.30•	56.10	77.17•	71.45
Solo (S)	12.45B	13.70A	6.09A	5.14B	14.55B	22.95A	0.00B	1.05A	31.92A	26.12B	46.47B	49.07A	68.36A	52.36B
Teste F														
Dose (D)	7.25**		208.20**		70.27**		37.15**		44.58**		7.22**		133.82**	
Solo (S)	40.64**		1056.59**		416.42**		196.22**		41.40**		6.63*		413.29**	
D x S	1.14^{NS}		3.44*		6.51**		37.15**		5.69**		1.85^{NS}		13.44**	
CV (%)	4.73		1.63		7.15		54.18		9.61		6.67		4.04	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [1] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [2] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.

Fonte: Produção do próprio autor.

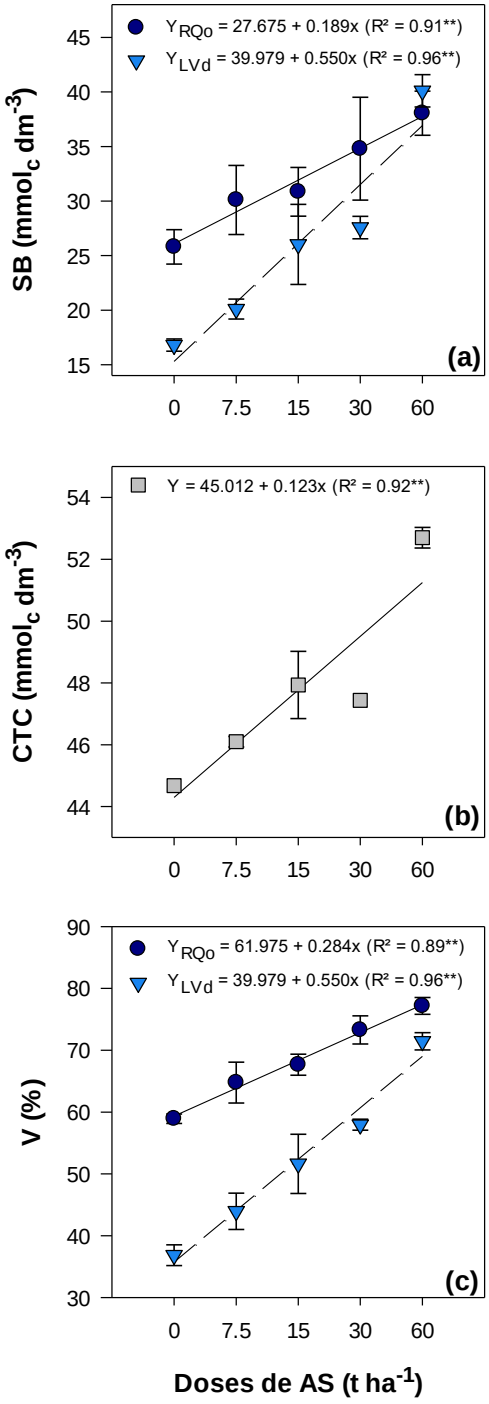
Figura 1 - Valores de matéria orgânica – MO (a) (valor médio para ambos os solos), pH (b), acidez potencial – H+Al (c) e trocável – Al (d) obtidos no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS)



Nota: ** e NS – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 2 - Valores de soma de base – SB (a), capacidade de troca catiônica – CTC (b) (valor médio para ambos os solos) e saturação por bases – V (c) obtidos no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS)



Nota: ** e ^{NS} – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Os teores de P, K, Ca apresentaram interação entre as doses de AS e os solos (Tabela 3). Em relação às doses de AS, houve variação nos teores de P, Ca e S (Tabela 3). Para o fator solos, notou-se diferença para Ca e Mg, tendo o RQo, teores superiores quando comparado ao LVd (Tabela 3).

Comparando o tratamento adicional, que recebeu a calagem e o fertilizante mineral convencional, e as doses de AS, pôde-se notar que, para o P, somente as doses de 15 e 60 t ha^{-1} no LVd se diferiram(Tabela 3). Já para o K, somente a dose de 30 t ha^{-1} no LVd não se assemelhou (Tabela 3). Em relação aos teores de Ca no solo, somente a dose de 0 t ha^{-1} diferiu do tratamento adicional, porém, para o LVd, apenas a dose de 15 t ha^{-1} no LVd se assemelhou (Tabela 3). Nos teores de Mg, para ambos os solos, pôde-se observar diferença para todas as doses, sendo que as maiores médias foram observadas no tratamento adicional (Tabela 3). No entanto, para o S, apenas as doses de 0 e 7.5 t ha^{-1} se diferiram, apresentando valores inferiores quando comparadas ao tratamento adicional (Tabela 3).

Pôde-se observar, no solo LVd, aumento linear para os teores de P (Figura 3a), variarando de 29.50 a 54.25 mg dm^{-3}. Porém, no solo RQo, não houve ajuste aos modelos de regressão, sendo encontrado o teor médio de 41.15 mg dm^{-3} (Figura 3a). Não houve ajuste aos modelos de regressão para os teores de K em ambos os solos, sendo encontrado o teor médio de 0.57 $mmol_c$ dm^{-3} nos dois solos (Figura 3b). Contudo, os teores de Ca aumentaram linearmente, variando de 18.00 a 30.00 $mmol_c$ dm^{-3} no RQo e de 11.75 a 33.00 $mmol_c$ dm^{-3} no LVd (Figura 3c). Em relação aos teores de S, houve aumento linear em resposta à aplicação das doses de AS, com teores médios que variaram de 2.00 a 3.00 mg dm^{-3} (Figura 3d).

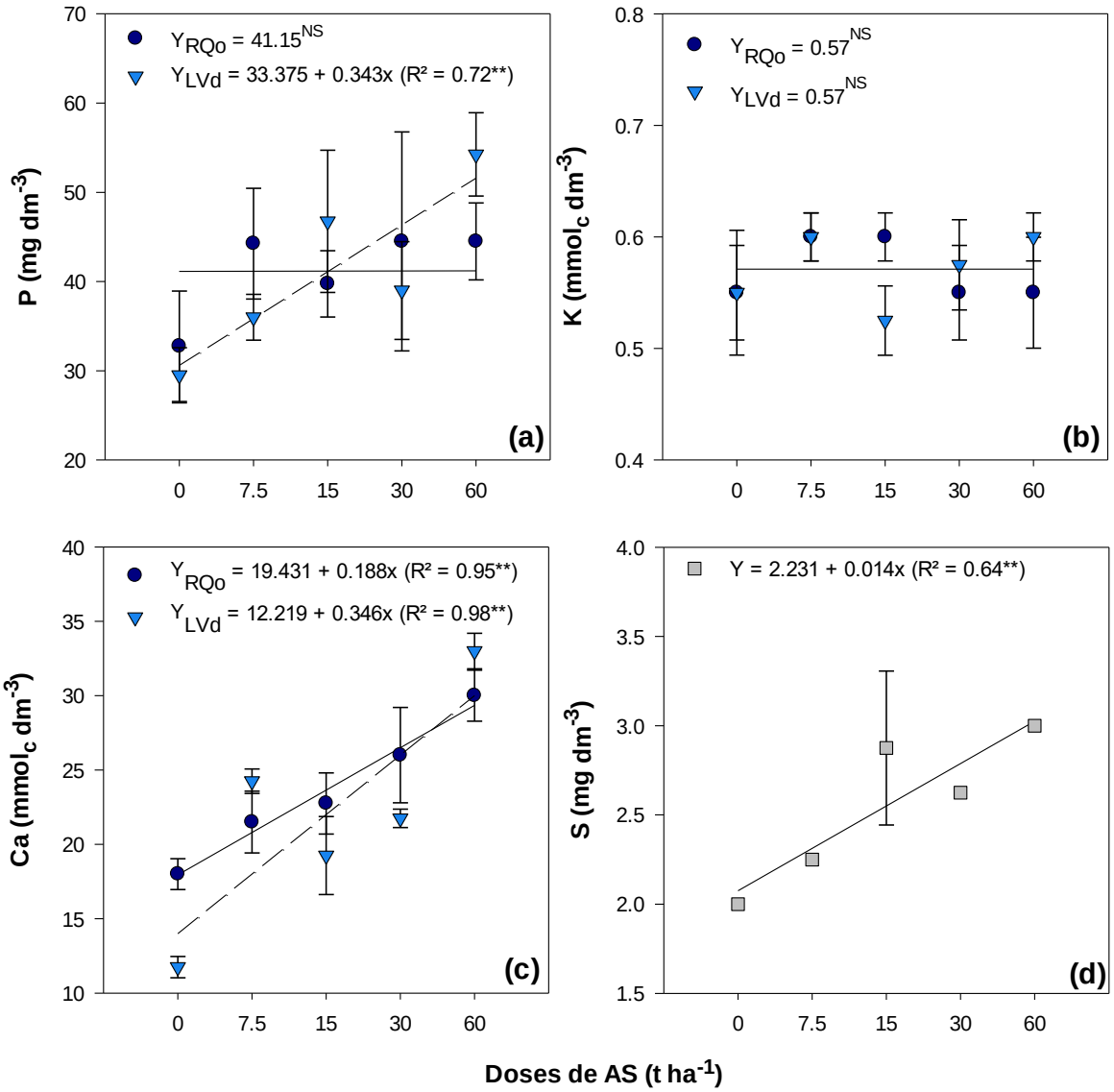
Tabela 3 - Efeito dos tratamentos nos teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) no solo após o cultivo de plantas de arroz no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamento	P_{resina}		K		Ca		Mg		S	
	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd
	mg dm^{-3}		$mmol_c$ dm^{-3}						mg dm^{-3}	
C+FMC	46.50•	35.25•	0.58•	0.60•	26.00•	17.75•	11.25•	9.50•	3.50•	3.00•
Doses de AS (D)[1]										
0.0[2] t ha^{-1}	32.75•	29.50•	0.55•	0.55•	18.00	11.75	7.25	4.50	2.00	2.00•
7.5 t ha^{-1}	44.25•	36.00•	0.60•	0.60•	21.50•	14.25	8.00	5.25	2.25	2.25•
15.0 t ha^{-1}	39.75•	46.75	0.60•	0.53•	22.75•	19.25•	7.50	6.25	2.75•	3.00•
30.0 t ha^{-1}	44.50•	39.00•	0.55•	0.58	26.00•	21.75	8.25	5.25	2.75•	2.50•
60.0 t ha^{-1}	44.50•	54.25	0.55•	0.60•	30.00•	33.00	7.50	6.50	3.00•	3.00•
Solo (S)	41.15A	41.10A	0.57A	0.57A	23.65A	20.00B	7.70A	5.55B	2.55A	2.55A
Teste F										
Dose (D)	7.83**		2.02^{NS}		79.98**		1.19^{NS}		6.36**	
Solo (S)	0.00^{NS}		0.00^{NS}		32.81**		35.34**		0.00^{NS}	
D x S	2.85*		3.08*		7.92**		1.37^{NS}		0.28^{NS}	
CV (%)	16.23		6.58		9.23		15.78		17.68	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [1] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [2] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 3 - Teores disponíveis de fósforo – P (a), potássio – K (b), cálcio – Ca (c) e enxofre – S (d) (valor médio para ambos os solos) no solo, após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)



Nota: ** e NS – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Observou-se interação entre as doses de AS e os solos para os teores de B, Cu e Mn (Tabela 4). Houve influência das doses para os teores de B, Cu, Fe e Mn (Tabela 4). Além disso, para todas as variáveis, notou-se variação entre os tipos de solos, sendo que os teores de Cu e Zn foram maiores no solo RQo e os teores de B, Fe e Mn foram maiores no solo LVd (Tabela 4).

Ao comparar o tratamento adicional (C+FMC) e as doses de AS, notou-se que, para o B, apenas as doses de 0, 7.5 e 15 t ha^{-1} de AS no LVd se assemelharam à C+FMC (Tabela 4). Somente as doses de 60 t ha^{-1} de AS no RQo e de 0, 15 e 60 t ha^{-1} no LVd para o Cu, assim como a dose de 0 t ha^{-1} de AS no RQo e LVd para o os teores de Fe e de 0 e 60 t ha^{-1} no RQo para o Zn, apresentaram diferenças em relação à C+FMC (Tabela 4). Quanto aos teores de Mn, em ambos os solos, todas as doses foram semelhantes à C+FMC (Tabela 4).

As doses de AS promoveram uma redução linear nos teores de B no solo RQo, variando de 0.16 a 0.04 mg dm^{-3} (Figura 4a). No entanto, no solo LVd, não houve ajuste aos modelos de regressão, sendo encontrado o teor médio de 0.30 mg dm^{-3} (Figura 4a). Os teores de Cu, em ambos os solos, também não se ajustaram aos modelos, apresentando um valor médio de 1.88 e 1.76 mg dm^{-3} e para o RQo e LVd, respectivamente (Figura 4b).

Houve redução linear dos teores de Fe em razão da aplicação das doses, com valores médios que variaram de 24.38 a 12.25 mg dm^{-3} (Figura 4c). Quanto aos teores de Mn, não houve ajuste aos modelos de regressão no RQo, sendo encontrado um valor médio de 4.24 mg dm^{-3} (Figura 4d). Enquanto no solo LVd, houve redução linear dos teores de Mn, variando de 6.68 a 4.48 mg dm^{-3} (Figura 4d).

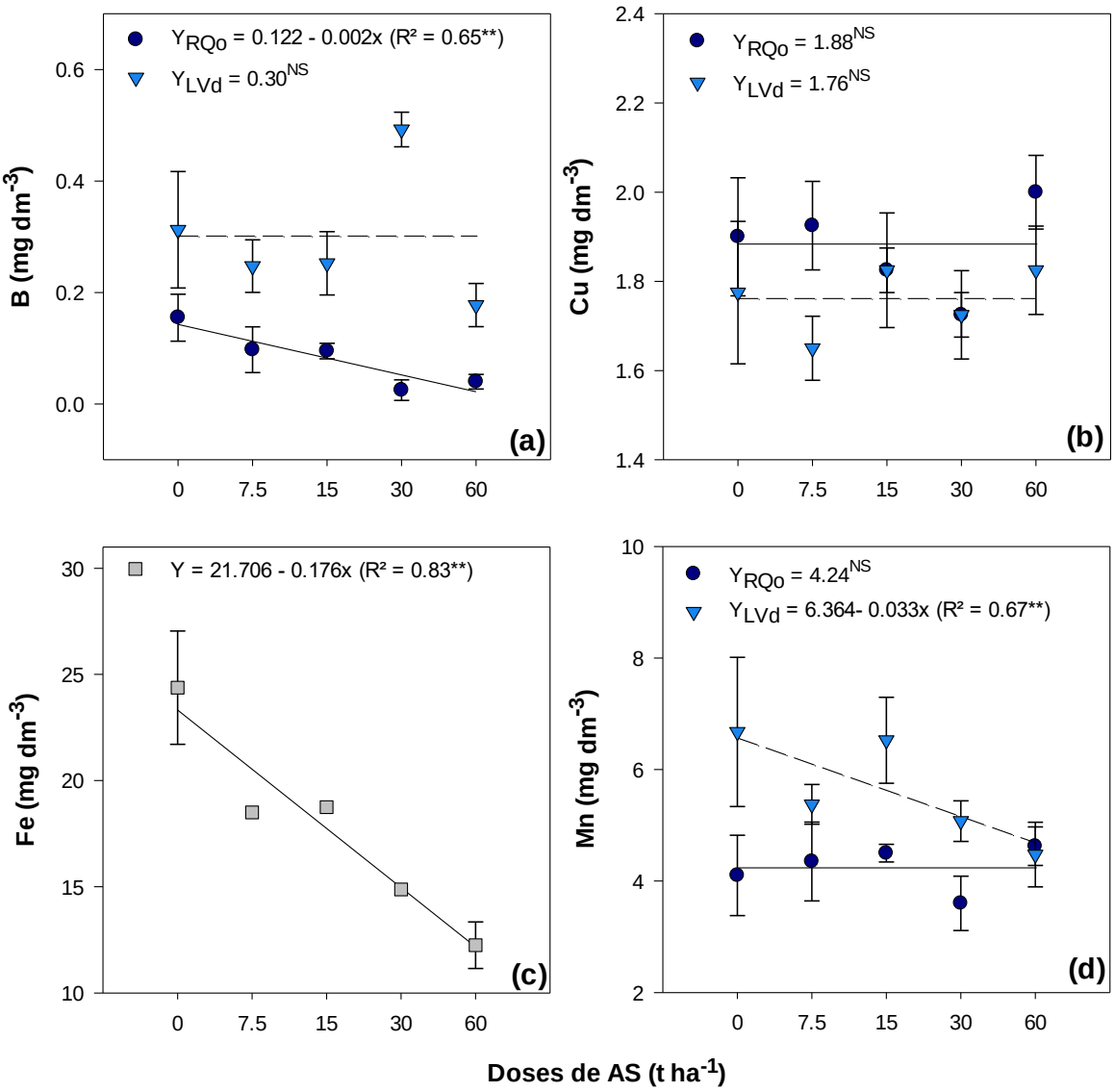
Tabela – 4 - Efeito dos tratamentos nos teores de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) no solo após o cultivo de plantas de arroz no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamento	**B**		**Cu**		**Fe**		**Mn**		**Zn**	
	RQo	**Lvd**	**RQo**	**Lvd**	**RQo**	**Lvd**	**RQo**	**Lvd**	**RQo**	**LVd**
	mg dm^{-3}									
C+FMC	0.34•	0.33•	1.70•	1.58•	10.25•	13.25•	4.30•	5.83•	3.93•	3.05•
Doses de AS (D)[1]										
0.0[2] t ha^{-1}	0.16	0.31•	1.90•	1.78	23.50	25.25	4.10•	6.68•	2.78	2.98•
7.5 t ha^{-1}	0.10	0.25•	1.93•	1.65•	17.00•	20.00•	4.35•	5.38•	3.50•	2.63•
15.0 t ha^{-1}	0.10	0.25•	1.83•	1.83	16.25•	21.25•	4.50•	6.53•	3.28•	2.70•
30.0 t ha^{-1}	0.03	0.49	1.73•	1.73•	12.25•	17.50•	3.60•	5.08•	2.98•	2.53•
60.0 t ha^{-1}	0.04	0.18	2.00	1.83	11.50•	13.00•	4.62•	4.48•	2.85	2.75•
Solo (S)	0.08B	0.30A	1.88A	1.76B	16.10B	19.40A	4.24B	5.63A	3.08A	2.72B
Teste F										
Dose (D)	9.53**		3.76**		7.14**		5.07**		0.70^{NS}	
Solo (S)	157.94**		13.13**		4.63*		46.70**		6.76*	
D x S	13.90**		2.77*		0.26^{NS}		5.22**		1.83^{NS}	
CV (%)	25.24		5.62		28.95		12.99		14.63	

**, * e–^{NS} - Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [1] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [2] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura – 4 - Teores disponíveis de boro – B (a), cobre – Cu (b), ferro – Fe (c) (valor médio para ambos os solos) e manganês – Mn (d) no solo, após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)



Nota: ** e ^{NS} – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Houve interação entre as doses de AS e os solos para o teor de Si (Tabela 5). Além disso, foi observado influência das doses de AS e dos solos, tendo o RQo teores superiores quando comparado ao LVd (Tabela 5).

Para os teores de Si, ao comparar a C+FMC com as doses de AS, pôde-se notar que, no solo RQo, diferença, com valores foram superiores nos tratamentos que receberam doses de AS (Tabela 5). Já no solo LVd, as doses de 15 e 30 t ha^{-1}

apresentaram diferença e valores superiores quando comparadas ao tratamento adicional (Tabela 5).

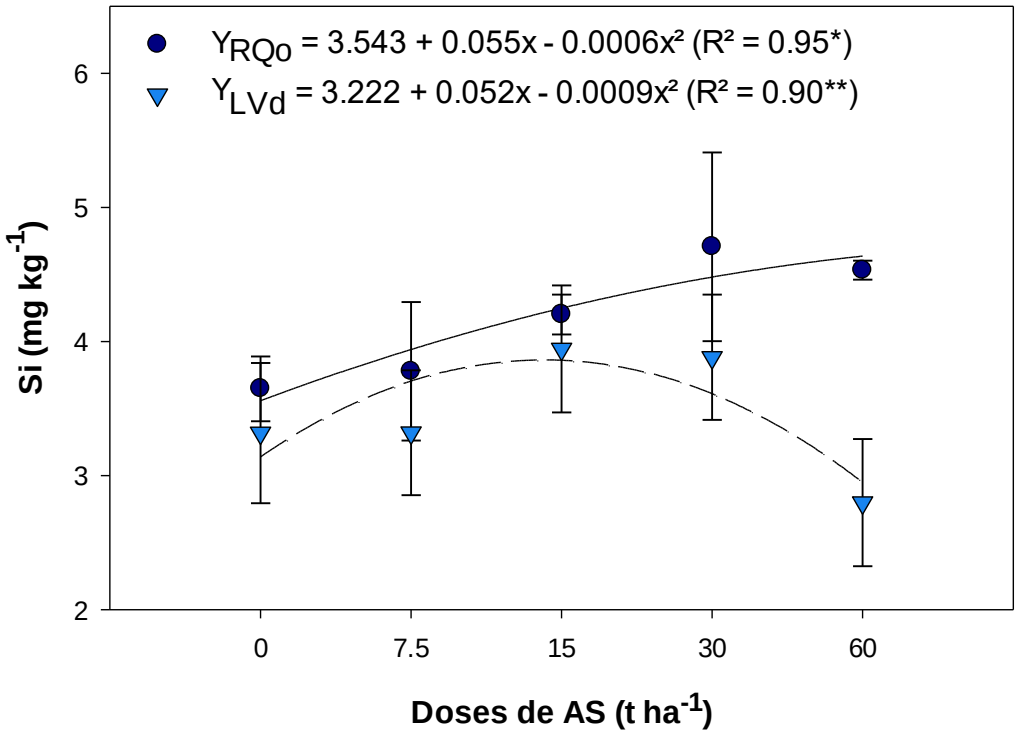
Notou-se ajuste quadrático para ambos os solos, no qual as doses de 45.83 e 28.89 t ha^{-1} de AS proporcionaram maiores teores de Si nos solos RQo (4.80 mg kg^{-1}) e LVd (3.97 mg kg^{-1}) (Figura 5), respectivamente.

Tabela 5 - Efeito dos tratamentos no teor de silício (Si) no solo após o cultivo de plantas de arroz no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamento	**Si**	
	RQo	**LVd**
	mg kg^{-1}	
C+FMC	2.54•	2.34•
Doses de AS (D)(1)		
0.0(2) t ha^{-1}	3.65	3.32•
7.5 t ha^{-1}	3.78	3.32•
15.0 t ha^{-1}	4.20	3.95
30.0 t ha^{-1}	4.71	3.88
60.0 t ha^{-1}	4.53	2.80•
Solo (S)	4.17A	3.45B
Teste F		
Dose (D)	4.67**	
Solo (S)	24.24**	
D x S	3.44*	
CV (%)	12.92	

**, * e NS – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. (1) Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. (2) Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 5 - Teores disponíveis de silício (Si) no solo, após o cultivo do arroz em reposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)



Nota: ** e * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 PLANTA

Não houve interação entre as doses do AS e os solos para a altura de plantas (AP), índice de clorofila foliar (ICF), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR) (Tabela 6). Também não foi observado influência das doses para as quatro variáveis (Tabela 6). Contudo, para AP, houve variação entre os tipos de solos, sendo que, apresentou maiores valores quando as plantas foram cultivadas no solo RQo (Tabela 6).

Ao comparar as doses de AS com o tratamento adicional, para AP e MSR, os resultados foram similares (Tabela 6). Em relação ao ICF, as doses de 0, 7.5 e 30 t ha^{-1} no LVd se diferiram. Já para a MSPA, somente as doses de 15 e 60 t ha^{-1} de AS

no RQo e de 7.5 t ha^{-1} no LVd se assemelharam, sendo que, as outras doses apresentaram valores de MSPA superiores aos do tratamento adicional (Tabela 6).

Tabela 6 - Efeito dos tratamentos na altura das plantas (AP), índice de clorofila foliar (ICF), matéria seca da parte aérea (MSPA) e raízes (MSR) aos 80 dias após a emergência (DAE) das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamentos	**AP**		**ICF**		**MSPA**		**MSR**	
	RQo	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**
	——— cm ———				——— g ———		——— g ———	
C+FMC	99.50•	101.25•	34.65•	30.68•	13.27•	12.67•	4.81•	3.68•
Doses de AS (D)[1]								
0.0[2] t ha^{-1}	110.25•	99.25•	38.43•	38.58	14.77	15.38	3.61•	2.99•
7.5 t ha^{-1}	110.25•	98.50•	38.18•	39.83	14.97	14.47•	3.85•	3.55•
15.0 t ha^{-1}	100.50•	100.00•	34.43•	37.73•	14.58•	15.27	3.53•	3.72•
30.0 t ha^{-1}	103.25•	100.75•	35.18•	41.15	15.41	15.46	3.68•	3.57•
60.0 t ha^{-1}	104.25•	100.75•	37.23•	38.00•	14.55•	14.97	3.80•	2.85•
Solo (S)	105.70A	99.85B	36.69A	39.06A	14.86A	15.11A	3.69A	3.34A
Teste F								
Dose (D)	0.74^{NS}		0.65^{NS}		1.26^{NS}		0.48^{NS}	
Solo (S)	9.40**		3.60^{NS}		1.19^{NS}		2.15^{NS}	
D x S	1.46^{NS}		0.70^{NS}		0.88^{NS}		0.66^{NS}	
CV (%)	5.90		10.68		5.01		21.20	

** e ^{NS} - Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [1] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [2] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.
Fonte: Produção do próprio autor.

Houve interação entre as doses de AS e os solos para o acúmulo de S (Tabela 7). As doses não influenciaram os acúmulos dos macronutrientes. Notou-se variação entre os tipos de solos para o acúmulo de N, K e Ca, sendo que eles apresentaram maiores acúmulos nas plantas cultivadas no LVd (Tabela 7).

Ao comparar as doses de AS e o tratamento adicional, diferenças foram observadas no acúmulo de Ca para as doses de 30 t ha^{-1} de AS no RQo e de 0, 15 e 30 t ha^{-1} no LVd. Entretanto, para o N, P, K e Mg e S não houve variação (Tabela 7). O acúmulo de S, no solo RQo, se ajustou ao modelo quadrático, com ponto de máximo na dose de 34.80 t ha^{-1} (13.90 mg por planta) (Figura 6). Quanto ao LVd, houve redução linear, com valores que variaram de 14.20 a 10.17 mg por planta (Figura 6).

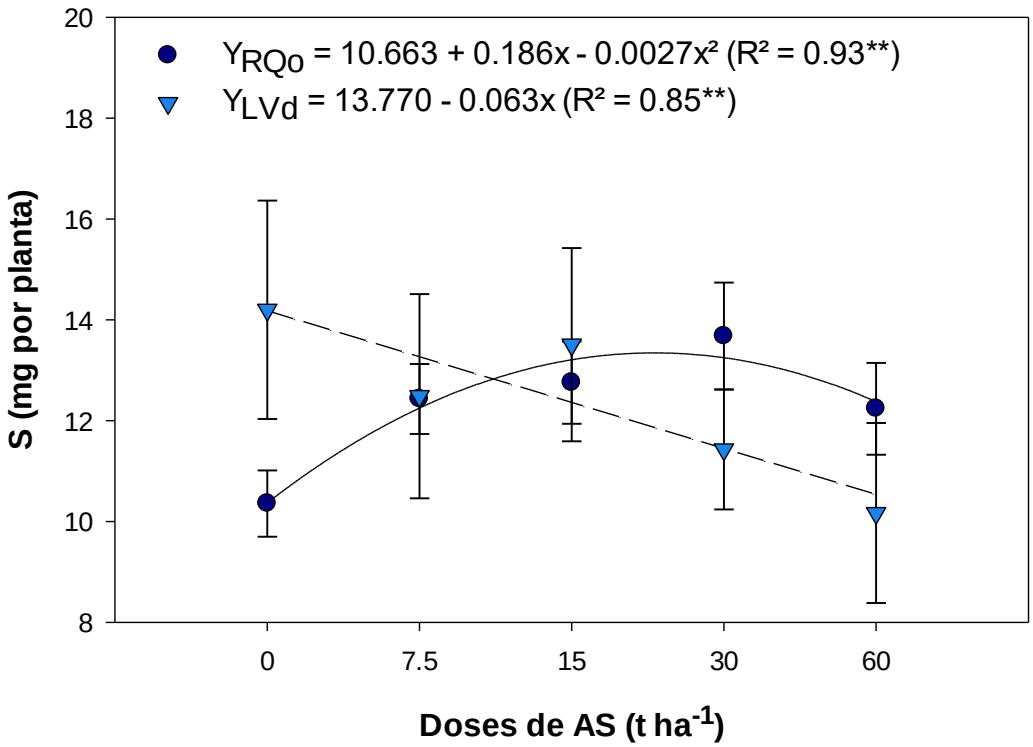
Tabela 7 - Efeito dos tratamentos nos acúmulos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na parte aérea das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamentos	N		P		K		Ca		Mg		S	
	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd
	mg por planta											
C+FMC	120.97•	138.87•	31.07•	26.07•	107.49•	100.73•	46.44•	45.59•	38.84•	37.55•	12.12•	12.03•
Doses de AS (D)[1]												
0.0[2] t ha^{-1}	144.81•	151.78•	32.43•	28.30•	109.18•	123.15•	48.51•	59.03	31.91•	33.38•	10.36•	14.20•
7.5 t ha^{-1}	134.73•	145.47•	31.65•	29.91•	110.98•	110.13•	50.95•	54.82•	33.16•	30.35•	12.43•	12.49•
15.0 t ha^{-1}	140.18•	157.43•	30.48•	31.67•	104.56•	126.04•	50.55•	60.80	32.10•	36.20•	12.76•	13.51•
30.0 t ha^{-1}	141.05•	144.54•	28.64•	32.65•	112.46•	117.35•	52.95	58.36	37.58•	36.42•	13.68•	11.43•
60.0 t ha^{-1}	137.46•	147.77•	26.82•	29.18•	107.42•	119.03•	49.43•	56.20•	31.44•	36.75•	12.28•	10.17•
Solo (S)	139.65B	149.40A	30.00A	30.34A	108.92B	119.14A	50.48B	57.84A	33.24A	34.62A	12.29A	12.36A
Teste F												
Dose (D)	0.61^{NS}		1.29^{NS}		0.25^{NS}		0.65^{NS}		1.43^{NS}		1.90^{NS}	
Solo (S)	4.96*		0.12^{NS}		6.53*		21.69**		0.86^{NS}		0.02^{NS}	
D x S	0.27^{NS}		2.23^{NS}		0.92^{NS}		0.69^{NS}		1.05^{NS}		5.92**	
CV (%)	9.74		10.34		11.25		9.47		13.62		11.75	

**, * e ^{NS} - Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [1] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [2] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 6 - Acúmulo de enxofre (S) na parte aérea das plantas de arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)



Nota: ** – Significativo a 1% de probabilidade. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Em relação aos micronutrientes na parte aéreas das plantas de arroz, foi observado interação entre as doses de AS e os solos apenas para o acúmulo de Cu (Tabela 8). Houve diferença entre as doses de AS para o acúmulo de Mn e Zn (Tabela 8). Além disso, para todos os micronutrientes, notou-se variação entre os tipos de solos, visto que o B e o Cu apresentaram maiores valores quando as plantas foram cultivadas no RQo, enquanto o Fe, Mn e Zn no LVd (Tabela 8).

Ao contrapor a C+FMC às doses de AS, verificou-se que, para o Fe e Cu em ambos os solos, e para o B no RQo, não houve diferença (Tabela 8). Porém, diferenças foram observadas no acúmulo de B para as doses de 7.5 e 30 t ha^{-1} de AS no RQo (Tabela 8). Quanto ao Mn, apenas as doses de 30 e 60 t ha^{-1} de AS (RQo) e de 15 e 60 t ha^{-1} (LVd) foram similares à C+FMC (Tabela 8). O acúmulo de Zn foi semelhante à C+FMC na dose de 60 t ha^{-1} de AS nos dois solos (Tabela 8).

Pôde-se observar, no solo RQo, ajuste linear decrescente para o acúmulo de Cu, sendo que os valores variaram de 125.65 a 90.50 µg por planta (Figura 7a). Contudo, para o solo LVd, houve ajuste linear crescente, com valores que variaram de 80.96 a 124.00 µg por planta (Figura 7a).

Em resposta à aplicação das doses de AS, os acúmulos de Mn e Zn reduziram linearmente com valores médios que variaram de 8332.03 a 3936.65 µg por planta (Figura 7b) e 1380.89 a 758.87 µg por planta (Figura 7c), respectivamente.

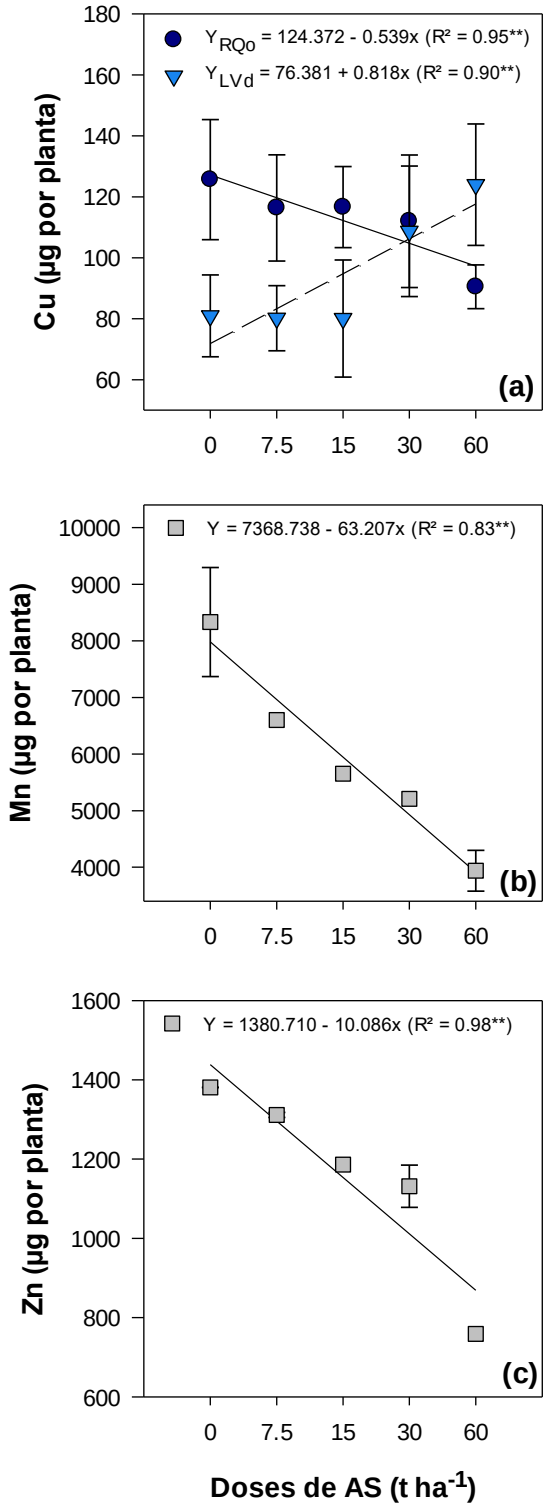
Tabela 8 - Efeito dos tratamentos nos acúmulos de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) na parte aérea das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico(RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamentos	B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd
	µg por planta									
C+FMC	240.28•	252.48•	83.32•	101.93•	804.98•	810.23•	2533.17•	3644.63•	642.98•	1010.75•
Doses de AS (D)[(1)]										
0.0[(2)] t ha^{-1}	198.77•	198.63•	125.65•	80.96•	951.99•	1234.02•	7870.75	8793.31	1182.01	1579.78
7.5 t ha^{-1}	217.41•	191.07	116.64•	80.19•	883.82•	1036.08•	6726.30	6478.59	1125.29	1497.50
15.0 t ha^{-1}	229.77•	228.62•	116.38•	80.08•	755.45•	1096.88•	5785.05	5521.05•	927.92	1444.39
30.0 t ha^{-1}	252.98•	195.46	112.01•	108.70•	737.73•	943.17•	3979.58•	6478.59	879.80	1383.42
60.0 t ha^{-1}	234.03•	201.62•	90.50•	124.00•	886.77•	789.16•	2719.57•	5153.73•	672.92•	844.81•
Solo (S)	226.59A	203.08B	112.24A	94.78B	843.15B	1019.86A	5416.25B	6476.92A	957.59B	1349.98A
Teste F										
Dose (D)	1.51^{NS}		0.71^{NS}		1.70^{NS}		12.14**		32.11**	
Solo (S)	6.17*		9.36**		6.05*		6.33*		105.66**	
D x S	1.28^{NS}		6.54**		1.11^{NS}		2.06^{NS}		2.64^{NS}	
CV (%)	13.60		17.69		24.94		24.37		10.98	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [(1)] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [(2)] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 7 - Acúmulo de cobre – Cu (a), manganês – Mn (b) (valor médio para ambos os solos) e zinco – Zn (c) (valor médio para ambos os solos) na parte aérea das plantas de arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)



Nota: ** – Significativo a 1% de probabilidade. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Houve interação entre as doses de AS e os solos para o teor de Si na parte aérea do arroz. Além disso, notou-se influência das doses de AS para o teor de Si. Porém, tanto para o teor quanto o acúmulo de Si, não foi observado variação entre os tipos de solos (Tabela 9).

Comparando o tratamento adicional e as doses de AS, pôde-se notar diferença para ambos (teor e acúmulo de Si) na dose de 60 t ha^{-1} no solo LVd, sendo que as maiores médias foram observadas nesse tratamento que recebeu a maior dose de AS (Tabela 9).

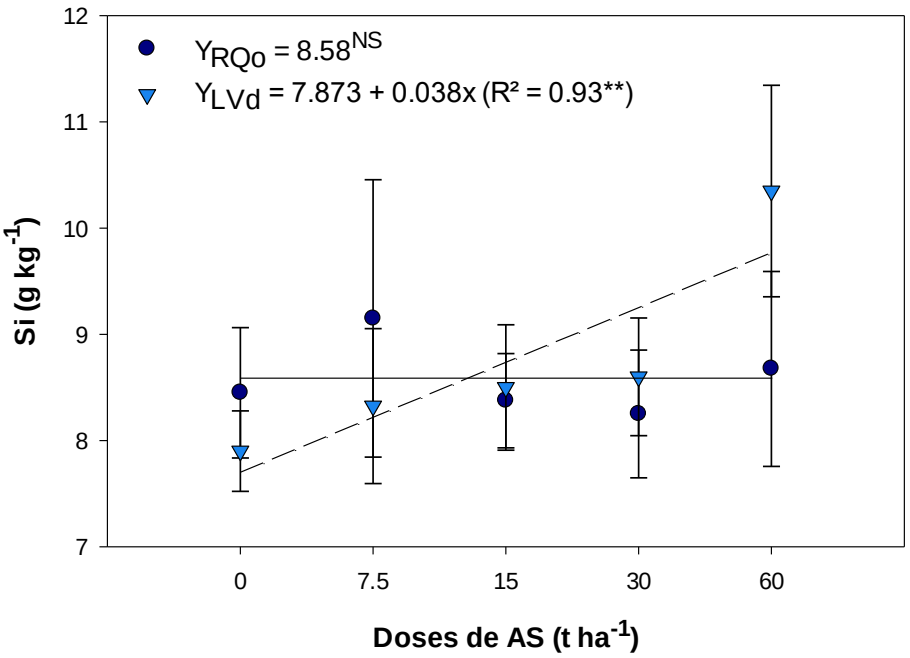
Os teores de Si aumentaram linearmente na parte aérea das plantas de arroz com o aumento das doses de AS no solo LVd, variando de 7.90 a 10.35 g kg^{-1} (Figura 8). No entanto, para o solo RQo, não houve ajuste aos modelos de regressão, sendo encontrado um teor médio de 8.58 g kg^{-1} de Si (Figura 8).

Tabela 9 - Efeito dos tratamentos no teor e acúmulo de silício (Si) na parte aérea das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamento	**Teor de Si**		**Acúmulo de Si**	
	RQo	**LVd**	**RQo**	**LVd**
	——— g kg^{-1} ———		——— mg por planta ———	
C+FMC	9.75•	8.48•	129.06•	107.33•
Doses de AS (D) (1)				
0.0 (2) t ha^{-1}	8.45•	7.90•	124.55•	121.74•
7.5 t ha^{-1}	9.15•	8.33•	137.20•	121.15•
15.0 t ha^{-1}	8.38•	8.50•	122.21•	129.79•
30.0 t ha^{-1}	8.25•	8.60•	126.69•	133.17•
60.0 t ha^{-1}	8.68•	10.35	126.32•	154.74
Solo (S)	8.58A	8.74A	127.39A	132.12A
Teste F				
Dose (D)	3.17*		1.62 ^{NS}	
Solo (S)	0.36^{NS}		1.04^{NS}	
D x S	2.81*		2.46^{NS}	
CV (%)	9.42		11.48	

* e ^{NS} – Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. (1) Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. (2) Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral. Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 8 - Teor de silício (Si) na parte aérea da cultura do arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)



Nota: ** e ^{NS} – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Apenas para o acúmulo de N, nas raízes das plantas de arroz, houve interação entre as doses de AS e os solos (Tabela 10). Em relação às doses de AS, pôde-se notar diferença para o acúmulo de Mg (Tabela 10). Além disso, para o fator solos, a variação entre os tipos de solos ocorreu para os acúmulos de N, P e S. Para o N e P, os acúmulos foram superiores no solo LVd, enquanto para o S, no RQo (Tabela 10).

Ao comparar as doses de AS com a C+FMC para o acúmulo de P, K e Mg (exceto a dose de 0 t ha^{-1}) e S, os resultados foram similares (Tabela 10). No entanto, para o N, as doses de 7.5 e 10 t ha^{-1} no LVd, e para o Ca, as doses de 0, 7.5, 15 e 30 t ha^{-1} no RQo se diferiram (Tabela 10).

Observou-se redução linear no acúmulo de N no solo RQo, variando de 33.80 a 21.00 mg por planta (Figura 9a). Entretanto, para o solo LVd, não houve ajuste aos modelos de regressão, apresentando um valor médio de 50.53 mg por planta (Figura 9a). Ademais, houve aumento linear no acúmulo de Mg, em razão da aplicação

das doses, com valores médios que variaram de 1.91 a 3.27 mg por planta (Figura 9b).

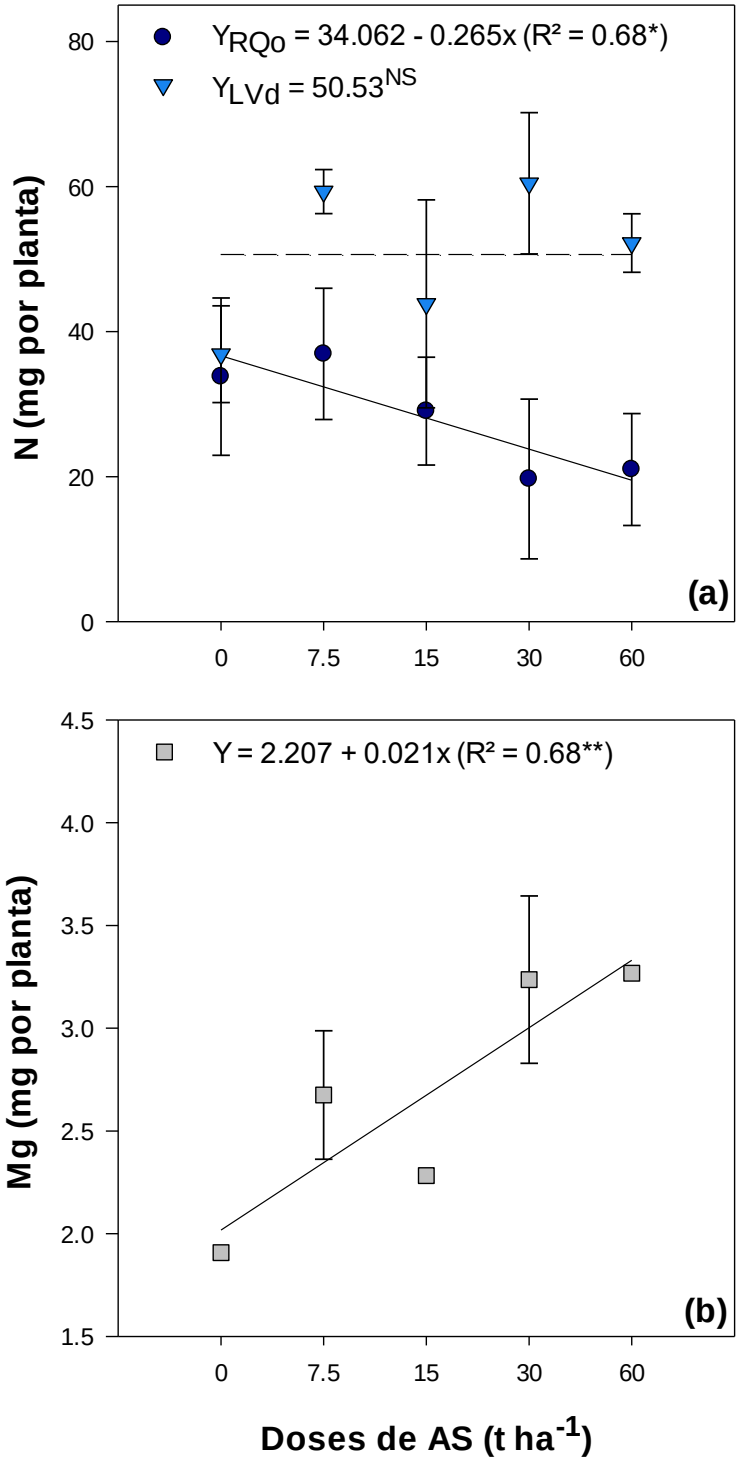
Tabela 10 - Efeito dos tratamentos nos acúmulos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) nas raízes das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamentos	**N**		**P**		**K**		**Ca**		**Mg**		**S**	
	RQo	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**
	mg por planta											
C+FMC	23.86•	30.86•	2.23•	3.18•	12.89•	13.46•	9.12•	14.69•	3.92•	3.74•	13.27•	10.36•
Doses de AS (D)[(1)]												
0.0[(2)] t ha^{-1}	33.80•	36.88•	1.71•	1.95•	10.23•	9.11•	7.33	5.52•	2.33•	1.48	9.71•	6.64•
7.5 t ha^{-1}	36.93•	59.31	1.36•	2.58•	9.61•	11.14•	7.56	9.63•	2.94•	2.41•	10.48•	9.95•
15.0 t ha^{-1}	29.04•	43.82•	1.05•	1.98•	9.16•	10.80•	6.93	7.56•	2.33•	2.24•	10.11•	9.35•
30.0 t ha^{-1}	19.69•	60.44	1.06•	3.18•	9.57•	11.38•	8.44	10.32•	3.12•	3.36•	11.70•	9.86•
60.0 t ha^{-1}	21.00•	52.21•	1.87•	2.17•	10.78•	9.59•	11.98•	7.56•	3.85•	2.69•	11.13•	7.36•
Solo (S)	28.09B	50.53A	1.41B	2.37A	9.87A	10.40A	8.45A	8.12A	2.91A	2.44A	10.63A	8.63B
Teste F												
Dose (D)	2.36^{NS}		0.98^{NS}		0.11^{NS}		2.60^{NS}		3.55*		1.20^{NS}	
Solo (S)	54.34**		20.46**		0.38^{NS}		0.18^{NS}		2.87^{NS}		6.07*	
D x S	4.56**		2.63^{NS}		0.63^{NS}		2.46^{NS}		0.80^{NS}		0.61^{NS}	
CV (%)	25.82		33.15		25.85		27.99		31.07		25.61	

**, * e ^{NS} - Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [(1)] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [(2)] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 9 - Acúmulo de nitrogênio – N (a) e magnésio - Mg (b) (valor médio para ambos os solos) nas raízes das plantas de arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)



Nota: ** , * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Não houve interação entre as doses de AS e os solos para os acúmulos de micronutrientes na raiz das plantas de arroz (Tabela 11). Houve influência das doses para os acúmulos de B e Zn (Tabela 11). Notou-se variação entre os tipos de solos para o acúmulo de Cu, sendo que as plantas apresentaram maiores acúmulos quando cultivadas no RQo (Tabela 11).

Ao comparar o tratamento adicional e as doses de AS, pôde-se notar que para os acúmulos de Cu, Fe e Mn, para ambos os solos, todas as doses foram similares (Tabela 11). Entretanto, para o acúmulo de B, todas as doses se diferiram do tratamento adicional. Ademais, o acúmulo de Zn também se diferiu do tratamento adicional nas doses de 15 e 60 t ha^{-1} do solo LVd (Tabela 11).

Não houve ajuste aos modelos de regressão para os acúmulos de B e Zn em resposta à aplicação das doses de AS, apresentando um valor médio de 155.48 e 228.18 µg por planta, respectivamente (Figura 10).

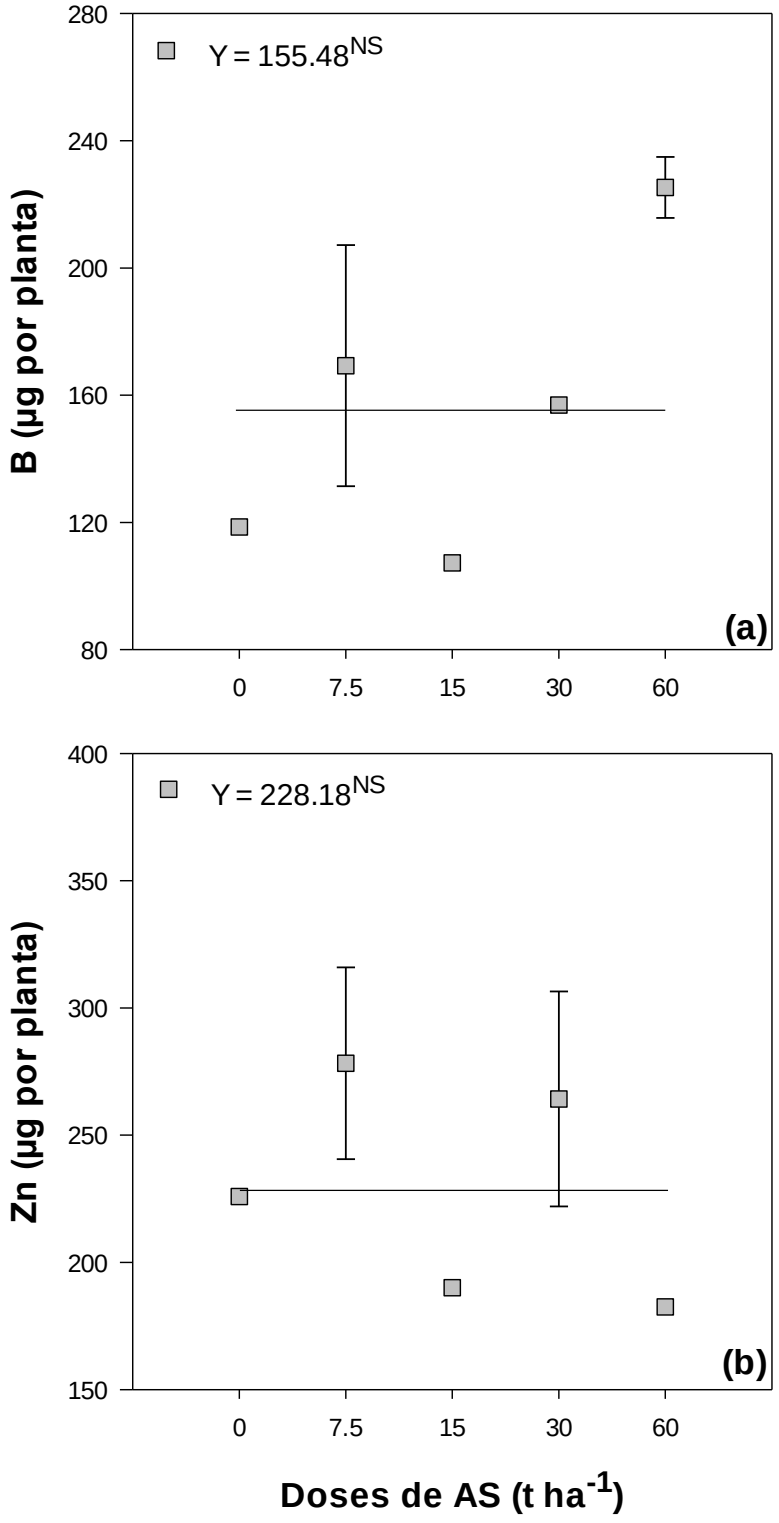
Tabela 11 - Efeito dos tratamentos nos acúmulos de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas raízes das plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamentos	**B**		**Cu**		**Fe**		**Mn**		**Zn**	
	RQo	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**	**RQo**	**LVd**
	µg por planta									
C+FMC	383.27•	322.76•	158.01•	123.45•	19655.84•	15370.06•	481.47•	435.19•	229.63•	331.33•
Doses de AS (D) (1)										
0.0 (2) t ha^{-1}	126.91	110.30	119.33•	71.56•	15208.88•	12625.14•	419.47•	526.51•	225.73•	226.10•
7.5 t ha^{-1}	141.91	196.67	120.53•	112.89•	16095.17•	15069.20•	463.58•	598.15•	236.79•	319.69•
15.0 t ha^{-1}	119.59	95.03	120.46•	81.94•	15015.53•	15650.53•	412.92•	405.84•	189.19•	190.90
30.0 t ha^{-1}	137.86	175.95	145.61•	114.87•	15430.03•	14805.62•	413.94•	559.40•	211.15•	317.31•
60.0 t ha^{-1}	266.78	183.84	160.27•	114.68•	15828.59•	11831.11•	471.72•	371.80•	185.27•	179.69
Solo (S)	158.61A	152.36A	133.24A	99.19B	15515.64A	13996.32A	436.33A	492.34A	209.63A	246.74A
Teste F										
Dose (D)	6.36**		2.52^{NS}		0.49^{NS}		1.08^{NS}		3.07*	
Solo (S)	0.14^{NS}		11.19**		2.08^{NS}		1.72^{NS}		2.88^{NS}	
D x S	2.18^{NS}		0.51^{NS}		0.58^{NS}		1.24^{NS}		1.18^{NS}	
CV (%)	27.84		26.76		21.88		29.14		29.20	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. • – Médias seguidas pelo mesmo símbolo na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade. C + FMC = Calagem + fertilizante mineral convencional. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. (1) Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. (2) Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 10 - Acúmulo de boro – B (a) (valor médio para ambos os solos) e zinco - Zn (b) (valor médio para ambos os solos) nas raízes das plantas de arroz em resposta ao efeito residual da aplicação de doses de agromineral silicático (AS) no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)



Nota: NS – Não significativo. As barras representam o desvio padrão da média.

Fonte: Produção do próprio autor.

Por meio da microscopia óptica, foi analisada a espessura da epiderme adaxial (Figura 11c, g, l) e abaxial (Figura 11d, g, k), do parênquima homogêneo (Figura 11c, h, l), do feixe vascular (Figura 11c, h), células buliformes (Figura 11d, h, k), espessura total das folhas de arroz, da nervura central e do aerênquima (Figura 11a, e, j) e o número de feixes vasculares (Figura 11a, f, i). Destas variáveis, não houve interação entre as doses de AS e os tipos de solos. Mas, a espessura da epiderme abaxial foi influenciada pelas doses de AS, sendo que as doses de 30 e 60 t ha^{-1} proporcionaram maiores valores. Além disso, notou-se variação entre os tipos de solos para a espessura da epiderme adaxial, espessura do parênquima, espessura do feixe vascular e do número de feixes vasculares. Os valores da espessura da epiderme adaxial e do número de feixes vasculares foram superiores quando as plantas foram cultivadas no solo RQo, já os valores da espessura do parênquima e do feixe vascular no solo LVd (Tabelas 12 e 13).

Não houve interação entre as doses de AS e os tipos de solo para a densidade estomática das epidermes adaxial e abaxial das folhas de arroz. Em relação às doses, foi observada diferença apenas na densidade estomática da epiderme adaxial, com as doses de 0 e 30 t ha^{-1} de AS propiciando maiores valores. Para o fator solos, não foi observado variação (Tabela 14).

A partir das análises de MEV nas folhas de arroz, foi possível observar papilas nas epidermes adaxial e abaxial e, também, nas células subsidiárias dos complexos estomáticos (Figura 12). Em alguns casos, devido à presença das papilas nas células subsidiárias dos complexos estomáticos, os estômatos estavam parcialmente ocluídos (Figura 12).

Tabela 12 - Efeito dos tratamentos na espessura dos componentes da anatomia foliar do arroz cultivado no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamento	Epiderme adaxial		Epiderme abaxial		Parênquima		Feixe vascular		Célula buliforme		Espessura total	
	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd
	µm											
Doses de AS (D)[1]												
0.0[2] t ha^{-1}	3.49a	3.49a	4.08b	4.16b	39.76a	41.29a	15.94a	16.99a	15.24a	15.67a	48.79a	49.33a
30.0 t ha^{-1}	3.69a	3.40a	4.41ab	4.23ab	37.21a	40.94a	15.13a	16.50a	15.14a	16.81a	46.35a	48.74a
60.0 t ha^{-1}	3.78a	3.51a	4.40a	4.49a	38.47a	41.71a	16.06a	17.01a	17.02a	18.01a	48.25a	50.51a
Solo (S)	3.65A	3.46B	4.29A	4.29A	38.48B	41.31A	15.71B	16.83A	15.80A	16.83A	47.80A	49.52A
Teste F												
Dose (D)	2.33^{NS}		5.36*		0.44^{NS}		1.05^{NS}		3.29^{NS}		0.67^{NS}	
Solo (S)	9.91**		0.00^{NS}		4.85*		6.22*		2.28^{NS}		1.54^{NS}	
D x S	2.49^{NS}		1.18^{NS}		0.27^{NS}		0.08^{NS}		0.28^{NS}		0.19^{NS}	
CV (%)	4.15		4.63		7.91		6.78		10.22		6.98	

**, * e ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [1] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [2] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 13 - Efeito dos tratamentos na espessura da nervura central e do aerênquima e no número de feixe vascular da folha arroz cultivado no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamento	Nervura central		Aerênquima		Nº feixe vascular	
	RQo	LVd	RQo	LVd	RQo	LVd
	μm					
Doses de AS (D)[1]						
0.0[2] t ha^{-1}	187.66a	154.64a	226.19a	174.44a	7a	5a
30.0 t ha^{-1}	180.36a	176.28a	233.90a	207.16a	7a	6a
60.0 t ha^{-1}	183.36a	195.26a	240.25a	230.28a	7a	6a
Solo (S)	183.69A	175.39A	233.45A	203.96A	7A	5B
Teste F						
Dose (D)	0.91^{NS}		1.69^{NS}		0.45^{NS}	
Solo (S)	0.57^{NS}		3.58^{NS}		7.29*	
D x S	1.46^{NS}		0.61^{NS}		0.35^{NS}	
CV (%)	14.94		17.46		25.91	

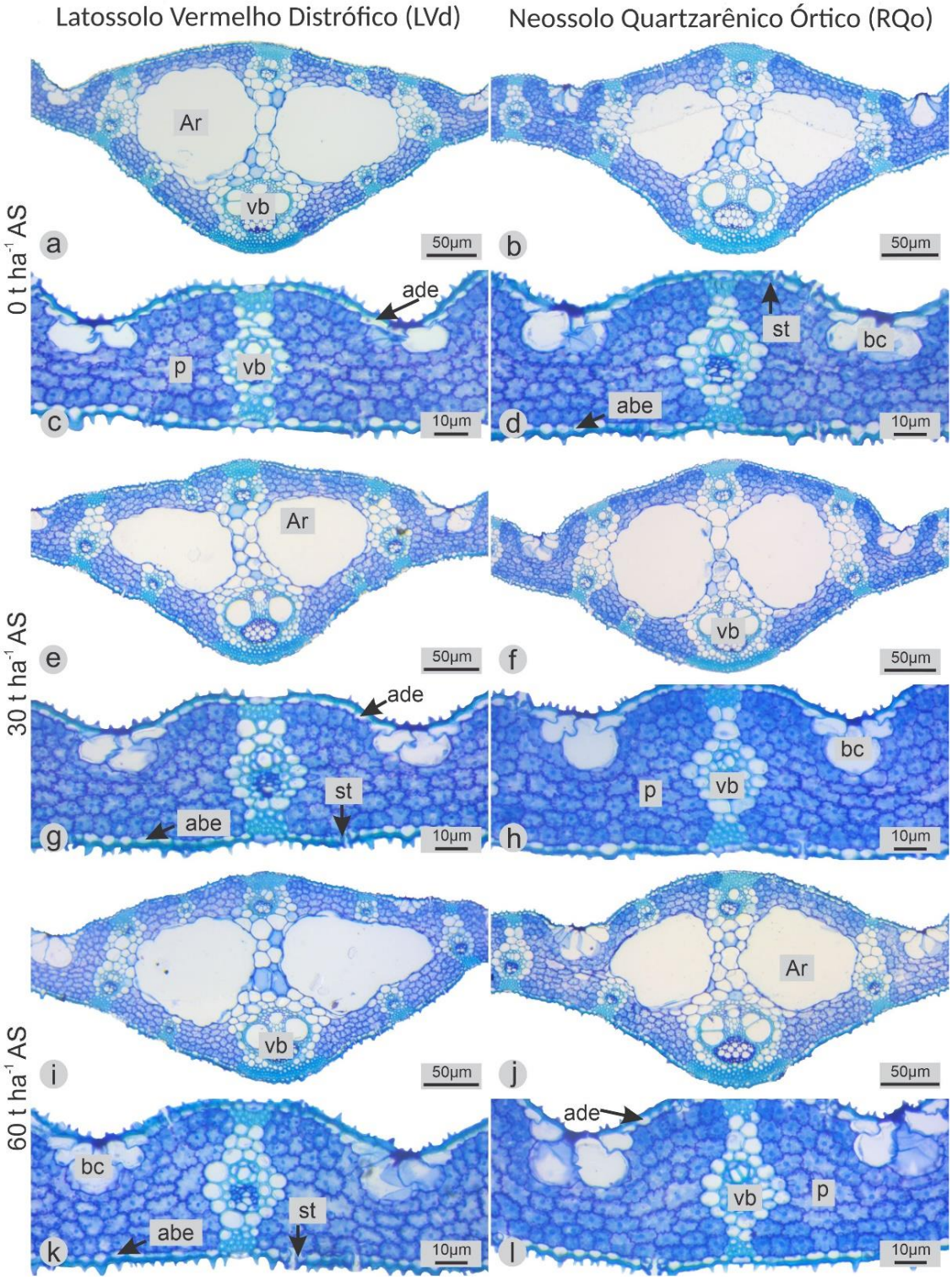
* e ^{NS} – Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [1] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [2] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.
Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 14 - Efeito dos tratamentos na densidade estomática das epidermes adaxial e abaxial da folha de arroz cultivado no Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)

Tratamento	**Estômatos adaxial**		**Estômatos abaxial**	
	RQo	**LVd**	**RQo**	**LVd**
	——— estômatos por mm^2 ———			
Doses de AS (D)[1]				
0.0[2] t ha^{-1}	641.69ab	677.03ab	586.20a	715.55a
30.0 t ha^{-1}	776.79a	645.42a	631.89a	575.65a
60.0 t ha^{-1}	573.11b	609.01b	609.31a	506.73a
Solo (S)	663.86A	643.82A	609.13A	599.31A
Teste F				
Dose (D)	4.09*		0.82^{NS}	
Solo (S)	0.34^{NS}		0.03^{NS}	
D x S	2.62^{NS}		1.43^{NS}	
CV (%)	12.88		23.98	

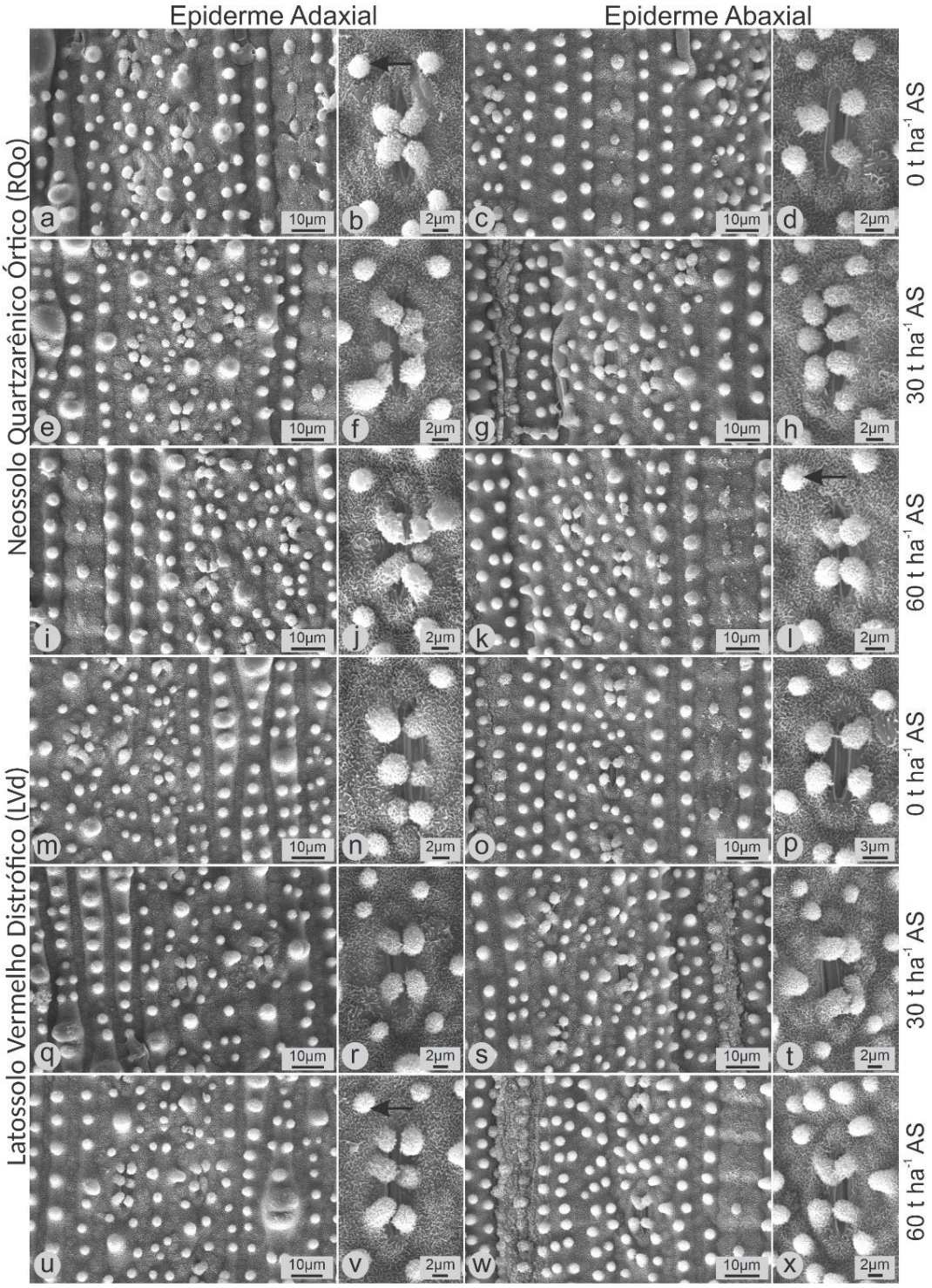
* e ^{NS} – Significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na mesma linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. AS = Agromineral silicático. CV = Coeficiente de variação. [1] Aplicação de doses do AS e adubação com N, P, K, S, B, Cu, Mn e Zn via fertilizante mineral. [2] Sem aplicação do AS e com adubação com N, P, K, S, B e Zn, via fertilizante mineral.
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 11 - Secções transversais de folhas de arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) em função da aplicação de doses (0, 30 e 60 t ha^{-1}) de agromineral silicático (AS), como indicados lateralmente às imagens. a.b.e.f.i.j. mostrando a nervura central. c.d.g.h.k.l. mostrando área laminar da folha. st = estômato, abe = epiderme abaxial, ade = epiderme adaxial, p = parênquima, bc = célula buliforme, Ar = aerênquima, vb = feixe vascular



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície foliar do arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado em um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) e um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) em função da aplicação de doses (0, 30 e 60 t ha^{-1}) de agromineral silicático (AS), como indicados lateralmente às imagens. a.e.i.m.q.u. visão ampla da epiderme adaxial; b.f.j.n.r.v. mostrando detalhe dos estômatos da epiderme adaxial. c.g.k.o.s.w. visão ampla da epiderme abaxial; d.h.l.p.t.x. mostrando detalhe dos estômatos da epiderme abaxial. As imagens b.l.v. estão indicando papilas que são possíveis de se encontrar em todas as imagens



Fonte: Produção do próprio autor.

5 DISCUSSÃO

A aplicação do AS proporcionou melhorias dos atributos químicos dos solos, conferindo-lhes condições para o adequado crescimento e desenvolvimento da cultura do arroz. Notou-se um poder de neutralização do AS, atuando como um corretivo de acidez para ambos os solos, com alteração da classificação da acidez ativa (pH), passando de alta (4.4–5.0) para baixa (5.6–6.0) no LVd, e de baixa para muito baixa (> 6.0) no RQo (Cantarella *et al.*, 2022). A elevação do pH pode ser atribuída a presença de CaO (10.56%) e MgO (5.67%) na composição do AS, que reagem com o hidrogênio do solo liberando água e dióxido de carbono. Os resultados corroboram com estudos anteriores (Luchese *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2020).

Apesar de ter seus teores reduzidos, a MO está dentro do esperado para essa rocha. O aumento do pH, em resposta às doses de AS, reduziu a acidez trocável (Al^{+3}) e potencial (H+Al). Conforme o pH se eleva (pH > 5.5), a fonte de acidez (H^{+}) do solo diminui, e o íon Al^{+3} é precipitado na forma de $Al(OH)_3$ (RAIJ, 2011). As doses de AS também promoveram o aumento de V, sendo que a maior dose, para ambos os solos, resultou em valores acima do recomendado para a cultura do arroz (V > 60%) (Cantarella *et al.*, 2022).

Outro indicativo das condições de fertilidade do solo é a soma de bases (Ca^{+2} + Mg^{+2} + K^{+}), que foi elevada em função das doses de AS aplicadas nos dois solos. Possivelmente, esse aumento é resultante do incremento dos teores de Ca^{+2} nos solos, advindo do AS. Outros estudos confirmam que o Ca é liberado por esses materiais rochosos (Burbano *et al.*, 2022; Luchese *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2020). Entretanto, não houve acúmulo de Ca na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz. Em relação aos teores de K e Mg, estes não apresentaram variações significativas na parte aérea das plantas de arroz. A ausência de resposta desses nutrientes no solo e na planta está, possivelmente, relacionada à liberação mais lenta de nutrientes do AS quando comparado às fontes mais solúveis.

Os teores de P aumentaram linearmente, no LVd uma vez que o Si restringe a sorção de P nos hidróxidos de Fe e Al (Meharg; Meharg, 2015). O ânion silicato, disponibilizado pelo agromineral silicático, compete com o ânion fosfato pelo mesmo local de adsorção, aumentando a disponibilidade de P (Luchese *et al.*, 2021). Além disso, a correção da acidez do solo acarreta no incremento de íons OH^{-} que podem

provocar dessorção dos íons fosfato, aumentando sua disponibilidade no solo (Sato; Comerford, 2005). Verificou-se alteração de classe para P, em culturas anuais, no solo LVd, saindo de teor médio (16–40 mg dm^{-3}) para alto (>41-80 mg dm^{-3}) na maior dose (Cantarella *et al.*, 2022). Para a obtenção da máxima produtividade das culturas, a agricultura depende de insumos de maior custo, principalmente de fertilizantes fosfatados inorgânicos (Withers *et al.*, 2018). No entanto, a longo prazo, esse sistema não é considerado econômica e ecologicamente sustentável, já que os fertilizantes fosfatados são um recurso não renovável e favorecem a eutrofização do meio ambiente (Santos *et al.*, 2019), portanto, manejos com agromineral silicático podem mitigar a futura escassez de P. Mesmo incrementando os teores de P no solo, não houve acúmulo de P na parte aérea e nas raízes das plantas de arroz.

No solo RQo, não houve ajuste aos modelos de regressão, para os teores de P, sendo encontrado o teor médio de 41.15 mg dm^{-3} de P. Em estudo realizado em um Argissolo Vermelho Distrófico com clones de eucalipto, verificou-se que a fertilização com 100 % de subproduto de rocha vulcânica (rocha de andesito), após nove meses de aplicação, proporcionou menores valores de P no solo do que quando comparado ao tratamento com adubação combinada com subproduto e NPK, sugerindo que a adição de NPK favoreceu o intemperismo da rocha, promovendo uma liberação mais rápida de P para o solo (Dalmora *et al.*, 2020).

A aplicação de doses de AS resultou em um aumento linear dos teores de S no solo. Embora o AS não contenha diretamente enxofre, seu efeito na dinâmica do solo promove a liberação e disponibilidade de nutrientes, incluindo o enxofre, ao alterar a decomposição da MO e prover a liberação de sulfatos e sulfetos (Tayade *et al.*, 2022). Quanto aos micronutrientes, apesar de sua redução no solo, os teores de Cu e Zn permanecem elevados (acima de 0.8 mg dm^{-3} para Cu e 1.2 mg dm^{-3} para o Zn). Os teores de Fe e Mn variam entre médios (5.0–12.0 mg dm^{-3} de Fe e 1.5–5.0 mg dm^{-3} de Mn) e altos (acima de 12.0 mg dm^{-3} para Fe e acima de 5.0 mg dm^{-3} para Mn). Já o B apresenta teores abaixo de 0.2 mg dm^{-3}, considerados baixos, e entre 0.2 e 0.6 mg dm^{-3}, classificados como médios (Cantarella *et al.*, 2022).

O Si disponível e absorvido pelas plantas da solução do solo é o ácido monosilícico (H_4SiO_4). Em ambos os solos, o aumento dos teores de Si disponível pode ser atribuído às doses de AS. Conforme o pH se aproxima da neutralidade, a adsorção de Si é favorecida (como silicato aniônico – $H_3Si0_4^-$) e a concentração de Si

na solução do solo diminui (Haynes; Zhou, 2018). O ácido monosilícico também é capaz de polimerizar nas superfícies de óxidos de Fe e Al, resultando no ácido monosilícico polimérico adsorvido (DIETZEL, 2000). Conforme relatado por (CHRISTL *et al.*, 2012), a polimerização é superior em pH 6.0. Como o ácido monosilícico apresenta alta mobilidade no solo e pode ser facilmente lixiviado, o processo de adsorção pode ser considerado uma forma de reter o Si no solo (Cornelis *et al.*, 2010).

Plantas consideradas acumuladoras de Si, como o arroz, apresentam teor de Si superior a 10 g kg^{-1} (Ma; Miyake; Takahashi, 2001). Essa absorção de Si é facilitada, nas plantas de arroz, pela presença de transportadores específicos de Si (Lsi1, Lsi2, Lsi3 e Lsi6) (Ma; Yamaji, 2015). No presente estudo, os teores encontrados ultrapassaram o valor de 10 g kg^{-1} na dose de 60 t ha^{-1} no solo LVd, sendo que a variação foi de 7.90 a 10.35 g kg^{-1} de Si, enquanto no RQo, foi encontrado um teor médio de 8.58 g kg^{-1} de Si (Figura 8).

A folha do arroz é composta por células epidérmicas, células do mesofilo, células buliformes e feixes vasculares. Das variáveis foliares analisadas, a epiderme abaxial foi a única influenciada pelas doses de AS, uma vez que, nas plantas de arroz, o Si se deposita preferencialmente nas células epidérmicas abaxiais (Hodson; Sangster, 1989), se polimerizando para formar duplas camadas de silício-cutícula (Kido *et al.*, 2015). Essas duplas camadas, conferem maior rigidez estrutural das lâminas foliares (Yamamoto *et al.*, 2012), limitando a perda de água e dificultando a penetração de patógenos e danos de pragas. Ocorrem variações no teor de Si em diferentes folhas da mesma planta, assim como em diferentes posições dentro de uma folha, sendo que, as folhas mais velhas apresentam maior deposição, bem como a parte basal da folha em relação à apical, uma vez que o Si é pouco móvel no floema da planta (Sangster *et al.*, 2001). Além da epiderme abaxial, a densidade estomática adaxial também foi influenciada pelas doses de AS, no entanto, como a ausência (dose 0 t ha^{-1}) do AS foi estatisticamente semelhante a dose de 30 t ha^{-1}, esse aumento estomático não é devido ao AS.

A textura do solo, que afeta a disponibilidade de água, associada a epiderme adaxial, lâmina foliar que recebe maior incidência de radiação, podem explicar o aumento da espessura da epiderme adaxial nos solos arenosos, com o intuito de minimizar a perda de água por transpiração (Batista *et al.*, 2010). Além disso, o aumento no número de feixes vasculares no solo arenoso pode resultar em folhas

mais largas e maior eficiência de transporte de fotoassimilados e produtividade de grãos (Feldman *et al.*, 2017), já que os feixes vasculares compreendem dois tecidos principalmente, o xilema (transporta água e nutrientes minerais solúveis), e o floema (transporta fotoassimilados) (Smet; Rybel, 2016).

O parênquima do arroz é homogêneo, não havendo diferenciação entre o parênquima clorofiliano paliçádico e lacunoso (Marcondes; Garcia, 2021). Essa região foliar é a responsável pela síntese de carboidratos por meio da fotossíntese, pois nela estão contidos os cloroplastos (Taiz *et al.*, 2017). Assim, é provável que a maior espessura do parênquima das plantas cultivadas nos solos argilosos propicie uma maior capacidade fotossintética. Embora as características dos feixes vasculares do arroz sejam determinadas principalmente por fatores genéticos e menos afetadas pelo ambiente (Liao *et al.*, 2021), em nosso estudo, as plantas exibiram aumento da espessura dos feixes vasculares ao serem cultivadas em solo argiloso, ou seja, no LVd.

A presença de papilas nas epidermes adaxial, abaxial e nas células subsidiárias dos complexos estomáticos implica em alterações na dinâmica estomática, nas trocas gasosas e na defesa contra patógenos. Tais observações corroboram com as descritas por Pitaloka *et al*. (2021). As papilas influenciam a dinâmica estomática, as trocas gasosas e a defesa contra patógenos (Pitaloka *et al.*, 2021). Enquanto os estômatos das folhas de arroz, que pertencente à família Poaceae, é constituído por células-guarda alongadas e em forma de haltere que são ladeadas por duas células subsidiárias (Fig. 12b, d, f, h, j, l, n, p, r, t, v, x) (Hepworth *et al.*, 2018).

Não há um consenso acerca das doses ideais de AS, sendo que as doses aplicadas podem variar de 0 a 100 t ha^{-1}, mas a maioria dos estudos concentra-se em doses entre 1 até 20 t ha^{-1} (Swoboda; Döring; Hamer, 2022). Em nosso estudo, constatamos que há efeito do AS na fertilidade do solo e na liberação de Ca e Si, contudo, as doses foram elevadas com valor médio de aplicação de 46 t ha^{-1} de AS para o solo RQo e 29 t ha^{-1} para o LVd considerando o Si. Para o Ca o aumento foi linear. Logo, parece ser mais vantajoso o uso regional do AS, havendo necessidade de mais pesquisa visando avaliar doses econômicas desses insumos, buscando validar os efeitos no sistema solo-planta em diferentes condições edafoclimáticas. A taxa de liberação dos nutrientes durante o ciclo das culturas também precisa ser melhor estudada, uma vez que a liberação gradual pode ocorrer muito lentamente

para alguns AS. Assim, os AS devem ser utilizados como remineralizadores de solos (considerar as especificações dispostas na legislação), sendo mais uma alternativa para auxiliar no manejo nutricional das culturas. Em função das suas características físico-químicas, não devem ser recomendados em substituição às fontes minerais de nutrientes com elevada solubilidade, embora apresentem potencial de complementariedade.

6 CONCLUSÃO

O residual das doses de AS possibilitou o incremento da fertilidade, alterando positivamente a reação dos solos estudados, sendo notado elevação do pH e redução da acidez trocável e potencial. Incrementou ainda, a soma de bases, a saturação por bases e a capacidade de troca catiônica, além de aumentar linearmente os teores de Ca e S no solo. O residual das doses de AS também disponibilizou uma pequena quantidade de Si nos solos, resultando em aumento no teor desse elemento benéfico na parte aérea e na epiderme abaxial da folha do arroz. Por outro lado, não influenciou na altura da planta, na produção de biomassa e nas quantidades acumuladas de macronutrientes (exceto de S) e de B e Fe na parte aérea, e de P, K, Ca e S e micronutrientes nas raízes das plantas de arroz. O AS liberou pequenas quantidades de Si no solo, porém, as doses são altas, sendo de 46 t ha^{-1} de AS no solo RQo (4.80 mg kg^{-1} de Si) e de 29 t ha^{-1} no LVd (3.97 mg kg^{-1} de Si). Os pós de rochas são subprodutos baratos e amplamente distribuídos, podendo ser uma fonte sustentável na agricultura para mitigar questões ambientais e socioeconômicas, relacionadas às melhorias de solos e contribuindo para resolver questões globais relacionadas às explorações minerais e agrícolas. Em países com elevada dependência de fertilizantes minerais como o Brasil, havendo disponibilidade de AS em regiões próximas às áreas cultivadas, pode ser incentivado o uso desse subproduto, porém, como remineralizador de solos. Todavia, é necessário considerar a viabilidade econômica e operacional, além de adequada recomendação agronômica para cada região, cultura agrícola e tipo de solo. Como perspectivas futuras, visando reduzir doses de AS, recomenda-se associar o uso de pó de rochas à adubação mineral e/ou orgânica tradicional, além de combinar ao uso de microrganismos promotores de crescimento de plantas.

REFERÊNCIAS

ABAY, K. A.; BREISINGER, C.; GLAUBER, J.; KURDI, S.; LABORDE, D.; SIDDIG, K. The Russia-Ukraine war: Implications for global and regional food security and potential policy responses. **Global Food Security**, Amsterdam, v. 36, p. 100675, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211912423000056. Acesso em: 8 maio 2024.

ABBAS, T. BALAL, R. M.; SHAHID, M. A.; PERVEZ, M. A.; AYYUB, C. M.; AQUEEL, M. A.; JAVAID, M. M. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (Abelmoschus esculentus) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 37, n. 2, p. 6, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11738-014-1768-5. Acesso em: 21 nov. 2024.

ABREU, M. F.; ABREU, C. A.; ANDRADE, J. C. Determinação de boro em água quente, usando aquecimento com microonda. *In*: RAIJ, B. V.; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001a. p. 231–239. Disponível em: https://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf.

ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; ANDRADE, J. C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7, 3. *In*: RAIJ, B. V.; ANDRANDE, J. C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001b. p. 240–250. Disponível em: https://scholar.google.com/scholar?cluster=11195884523984979116&hl=en&oi=scholarr. Acesso em: 22 mar. 2024.

AGUILERA, J. G.; ZUFFO, A. M.; RATKE, R. F.; TRENTO, A. C. S.; LIMA, R. E.; GRIS, G. A.; MORAIS, K. A. D.; SILVA, J. X.; MARTINS, W. C. Influencia de dosis de polvo de basalto sobre cultivares de soya, **Research, Society And Development**, Itabira, v. 9, n. 7, 2020.

ALOVISI, A. M. T.; TAQUES, M. M.; ALOVISI, A. A.; TOKURA, L. K.; SILVA, R. S.; PIESANTI, G. H. L. M. Alterações nos atributos químicos do solo com aplicação de pó de basalto. **Acta Iguazu**, Cascavel, p. 69–79, 2017. Disponível em: https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/18471. Acesso em: 21 mar. 2024.

AVILA, R. G.; MAGALHÃES, P. C.; SILVA, E. M.; SOUZA, K. R. D.; CAMPOS, C. N.; ALVARENGA, A. A.; SOUZA, T. C. Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 255, p. 107004, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377421002699. Acesso em: 25 mar. 2024.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. **AgroEstat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Jaboticabal: FCAV/UNESP, p. 396, 2015.

BATISTA, L. A. GUIMARÃES, R. J.; PEREIRA, F. J.; CARVALHO, G. R.; CASTRO, E. M. Leaf anatomy and water potential in the coffee cultivars tolerance to water stress. **Revista Ciência Agronômica**, Jaboticabal, v. 41, p. 475–481, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rca/a/Tk8sjTB6TzW6yzZtLKtsB8z/. Acesso em: 10 jun. 2024.

BEERLING, D. J.; KANTZAS, E. P.; LOMAS, M. R.; WADE, P.; EUFRASIO, R. M.; RENFORTH, P.;SARKAR, B.; ANDREWS, M. G.; JAMES, R. H.; PEARCE, C. R.; MERCURE, J. F.; POLLITT, H.; HOLDEN, P. B.; EDWARDS, N. R.; KHANNA, M.; KOH, L.; QUEGAN, S.; PIDGEON, N. F.; JANSSENS, I. A.; HANSEN, J.; BANWART, S. A. Potential for large-scale CO_2 removal via enhanced rock weathering with croplands. **Nature**, London, v. 583, n. 7815, p. 242–248, 2020. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41586-020-2448-9. Acesso em: 20 out. 2023.

BICCA, J. M.; ARDUIN, R. L. N., SPINELLI PINTO, L. F.; BAMBERG, A. L.; MIGUEL, P.; STUMPF, L. Clay stabilization and recovery of soil functions of a degraded solodic planosol through incorporation of agrominerals: A case study in southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 122, p. 104177, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981122004631. Acesso em: 25 mar. 2024.

BIN RAHMAN, A. N. M. R.; ZHANG, J. Trends in rice research: 2030 and beyond. **Food and Energy Security**, Oxford, v. 12, n. 2, p. e390, 2023. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fes3.390. Acesso em: 21 nov. 2024.

BRACKHAGE, C.; SCHALLER, J.; BÄUCKER, E.; DUDEL, E. G. Silicon Availability Affects the Stoichiometry and Content of Calcium and Micro Nutrients in the Leaves of Common Reed. **Silicon**, v. 5, n. 3, p. 199–204, 2013.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei No 12.890, de 10 de dezembro de 2013, que altera a Lei No 6.894 de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura**. Brasília, DF, 2013.

BRITO, R. S. D.; BATISTA, J. F.; MOREIRA, J. F. V.; MORAES, K. N. O; SILVA, S. O. Rochagem na agricultuta: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, [*s. l.],* v. 6, n. 1, 2019.

BURBANO, D. F. M.; THEODORO, S. H.; CARVALHO, A. M. X. ; RAMOS, C. G. Crushed Volcanic Rock as Soil Remineralizer: A Strategy to Overcome the Global Fertilizer Crisis. **Natural Resources Research**, New York, v. 31, n. 5, p. 2197–2210, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/s11053-022-10107-x. Acesso em: 5 jun. 2024.

CANTARELLA, H.; ZAMBROSI, F. C. B.; QUAGGIO, J. A.; DUARTE, A. P. Cereais. *In*: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JÚNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. V. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2022. p. 213–236.

CARDOZO, E.; PINTO, V.; NADALETI, W.; THUE, P. S. M.; GOMES, C.; RIBEIRO, A.; SILVA, A. C.; VIEIRA, B. Sustainable agricultural practices: Volcanic rock potential for soil remineralization. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 466, p. 142876, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624023254. Acesso em: 18 nov. 2024.

CHRISTL, I.; BRECHBÜHL, Y.; GRAF, M.; KRETZSCHMAR, R. Polymerization of Silicate on Hematite Surfaces and Its Influence on Arsenic Sorption. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 46, n. 24, p. 13235–13243, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1021/es303297m. Acesso em: 11 jul. 2024.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA - CNA; CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA. **PIB do Agronegócio Brasileiro**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx. Acesso em: 17 out. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Planilhas de Custos de Produção**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao. Acesso em: 21 nov. 2023.

CORNELIS, J. T.; RANGER, J.; ISERENTANT, A.; DELVAUX, B. Tree species impact the terrestrial cycle of silicon through various uptakes. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 97, n. 2, p. 231–245, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10533-009-9369-x. Acesso em: 6 jun. 2024.

DALMORA, A. C.; RAMOS, C. G.; OLIVEIRA, M. L. S.; OLIVEIRA, L. F. S; SCHNEIDER, I. A. H.; KAUTZMANN, R. M. Application of andesite rock as a clean source of fertilizer for eucalyptus crop: Evidence of sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 256, p. 120432, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620304790. Acesso em: 14 maio 2024.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. Disponível em: https://editora.pucrs.br/edipucrs/acessolivre/livros/microscopia.pdf. Acesso em: 29 ago. 2023.

DIETZEL, M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 64, n. 19, p. 3275–3281, 2000. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703700004269. Acesso em: 6 jun. 2024.

DURAND-MORAT, A.; BAIRAGI, S.; MULIMBI, W. International Rice Outlook: International Rice Baseline Projections 2022-2032. **AAES Research Reports and Research Bulletins**, 2023. Disponível em: https://scholarworks.uark.edu/aaesrb/56. Acesso em: 18 nov. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE EPSQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Esclarecimentos sobre uso de agrominerais silicáticos (remineralizadores) na agricultura - Esclarecimentos Oficiais - Portal Embrapa**, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/esclarecimentos-oficiais/-/asset_publisher/TMQZKu1jxu5K/content/esclarecimentos-sobre-uso-de-agrominerais-silicaticos-remineralizadores-na-agricultura?inheritRedirect=false. Acesso em: 10 maio 2024.

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology**, Chichester, v. 155, n. 2, p. 155–160, 2009. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x. Acesso em: 10 jun. 2024.

FALKER. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030)**, Porto Alegre: [*s. n*.], 2008. 33 p.

FELDMAN, A. B.; LEUNG, H.; BARAOIDAN, M.; ELMIDO-MABILANGAN, A.; CANICOSA, I.; QUICK, W. P.; SHEEHY, J.; MURCHIE, E. H. Increasing Leaf Vein Density via Mutagenesis in Rice Results in an Enhanced Rate of Photosynthesis, Smaller Cell Sizes and Can Reduce Interveinal Mesophyll Cell Number. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, 2017. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2017.01883/full. Acesso em: 11 jun. 2024.

GREGER, M.; LANDBERG, T.; VACULÍK, M. Silicon Influences Soil Availability and Accumulation of Mineral Nutrients in Various Plant Species. **Plants,** Basel, v. 7, n. 2, p. 41, 2018.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J-D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 32, n. 1, p. 201–213, 2012.

HAYNES, R. J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 6, p. 831–844, 2014. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jpln.201400202. Acesso em: 9 maio 2024.

HAYNES, R. J.; ZHOU, Y-F. Competitive and noncompetitive adsorption of silicate and phosphate by two acid Si-deficient soils and their effects on P and Si extractability. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 64, n. 4, p. 535–541, 2018. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00380768.2018.1473008. Acesso em: 6 jun. 2024.

HEPWORTH, C.; CAINE, R. S.; HARRISON, E. L.; SLOAN, J.; GRAY, J. E. Stomatal development: focusing on the grasses. **Current Opinion in Plant Biology**, Kidlington, v. 41, Growth and development, p. 1–7, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.07.009 7. Acesso em: 5 jul. 2024.

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. Silica deposition in the inflorescence bracts of wheat (*Triticum aestivum* L.) II. X-ray microanalysis and backscattered electron imaging. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 67, n. 2, p. 281–287, 1989. Disponível em: https://doi.org/10.1139/b89-041.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw-Hill, 1940.

KATZ, O.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; PRAKASH, N. B.; SCHALLER, J. Silicon in the Soil–Plant Continuum: Intricate Feedback Mechanisms within Ecosystems. **Plants**, Basel, v. 10, n. 4, p. 652, 2021.

KELEMEN, P. B.; MCQUEEN, N.; WILCOX, J.; RENFORTH, P.; DIPPLE, G.; VANKEUREN, A. P. Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO2 removal from air: Review and new insights. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 550, p. 119628, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119628.. Acesso em: 20 out. 2023.

KELLAND, M. E.; WADE, P. W.; LEWIS, A. L.; TAYLOR, L. L.; SARKAR, B.; ANDREWS, M. G.; LOMAS, M. R.; COTTON, T. E. A.; KEMP, S. J.; JAMES, R. H.; PEARCE, C. R.; HARTLEY, S. E.; HODSON, M. E.; LEAKE, J. R.; BANWART, S. A.; BEERLING, D. J. Increased yield and CO_2 sequestration potential with the C4 cereal Sorghum bicolor cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. **Global Change Biology**, Chichester, v. 26, n. 6, p. 3658–3676, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1111/gcb.15089. Acesso em: 20 out. 2023.

KIDO, N.; YOKOYAMA, R.; YAMAMOTO, T.; FURUKAWA, J.; IWAI, H.; SATOH, S.; NISHITANI, K.. The matrix polysaccharide (1;3,1;4)-β-D-glucan is involved in silicon-dependent strengthening of rice cell wall. **Plant & Cell Physiology,** Oxford, v. 56, n. 2, p. 268–276, 2015.

LEFEBVRE, D.; GOGLIO, P.; WILLIAMS, A.; MANNING, D. A. C.; AZEVEDO, A. C.; BERGMANN, M.; MEERSMANS, J.; SMITH, P. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 233, p. 468–481, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099. Acesso em: 14 maio 2024.

LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. **Silicon in Agriculture**: from theory to practice. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.

LIAO, S.; YAN, J.; XING, H.; TU, Y.; ZHAO, H.; WANG, G. Genetic basis of vascular bundle variations in rice revealed by genome-wide association study. **Plant Science**, v. 302, p. 110715, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110715. Acesso em: 11 jun. 2024.

LUCHESE, A. V.; PIVETTA, L. A.; BATISTA, M. A.; STEINER, F.; GIARETTA, A. P. S.; CURTIS, J. C. D. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. **African Journal of Agricultural Research**, Shannon, v. 17, n. 3, p. 487–497, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15234. Acesso em: 4 jun. 2024.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. *In*: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Studies in Plant Science**. Elsevier, 2001. (Silicon in Agriculture). v. 8, p. 17–39. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9. Acesso em: 14 maio 2024.

MA, J. F.; YAMAJI, N. A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 20, n. 7, p. 435–442, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007. Acesso em: 7 jun. 2024.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral das plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MANNING, D. A. C.; BAPTISTA, J.; LIMON, M. S.; BRANDT, K. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 574, p. 476–481, 2017.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Instrução Normativa Nº 5, de 10 de março de 2016**. 2016. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Indicadores da agricultura**. 2023. Disponível em: https://indicadores.agro.gov.br/. Acesso em: 21 mar. 2024.

MARCONDES, J.; GARCIA, A. B. Cytomorphologic aspects of saline stress on rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 76, p. 187–194, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1808-1657v76p1872009. Acesso em: 11 jun. 2024.

MBISSIK, A.; ELGHALI, A.; OUABID, M.; RAJI, O.; BODINIER, J-L.; EL MESSBAHI, H. Alkali-Hydrothermal Treatment of K-Rich Igneous Rocks for Their Direct Use as Potassic Fertilizers. **Minerals**, Berlin, v. 11, n. 2, p. 140, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/min11020140. Acesso em: 20 out. 2023.

MEDEIROS, D. S.; SANCHOTENE, D. M.; RAMOS, C. G.; OLIVEIRA, L. F. S.; SAMPAIO, C. H.; KAUTZMANN, R. M. Soybean crops cultivated with dacite rock by-product: A proof of a cleaner technology to soil remineralization. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 9, n. 6, p. 106742, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106742. Acesso em: 23 out. 2024.

MEHARG, C.; MEHARG, A. A. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice?. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 120, p. 8–17, 2015.

MITANI-UENO, N.; MA, J. F. Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 67, n. 1, p. 10–17, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1845972. Acesso em: 21 jun. 2024.

MOHAMMED, S. M. O.; BRANDT, K.; GRAY, N. D.; WHITE, M. L.; MANNING, D. A. C. Comparison of silicate minerals as sources of potassium for plant nutrition in sandy soil. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 65, n. 5, p. 653–662, 2014.

NASCIMENTO, M.; LOUREIRO, F. E. L. **Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. (Estudos e Documentos).

NOGUEIRA, T. A. R.; ABREU-JUNIOR, C. H.; ALLEONI, L. R. F.; HE, Z.; SOARES, M. R.; SANTOS VIEIRA, C.; LESSA, L. G. F.; CAPRA, G. F. Background concentrations and quality reference values for some potentially toxic elements in soils of São Paulo State, Brazil. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 221, p. 10–19, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.048. Acesso em: 21 jun. 2024.

NOGUEIRA, T. A. R. *et al.* Nepheline Syenite and Phonolite as Alternative Potassium Sources for Maize. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 7, p. 1385, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4395/11/7/1385. Acesso em: 20 out. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Transformando nosso mundo:** a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. [*S. l.*], 2015.

PEIXOTO, M. L.; MORAES, J. C.; SILVA, A. A.; ASSIS, F. A. Effect of silicon on the oviposition preference of Bemisia tabaci Biotype B (GENN.) (*Hemiptera: aleyrodidae*) on bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 3, p. 478–481, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542011000300006. Acesso em: 11 jul. 2024.

PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H. **Análise de silício no solo, planta e fertilizante**. 2. ed. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2016. (Boletim Técnico, 2).

PITALOKA, M. K.; HARRISON, E. L.; HEPWORTH, C.; WANCHANA, S.; TOOJINDA, T.; PHETLUAN, W.; BRENCH, R. A.; NARAWATTHANA, S.; VANAVICHIT, A.; GRAY, J. E.; CAINE, R. S.; ARIKIT, S. Rice Stomatal Mega-Papillae Restrict Water Loss and Pathogen Entry. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, 2021. Disponível em: https: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.677839. Acesso em: 5 jul. 2024.

PLANO NACIONAL DE FERTILIZANTES - PNF. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf. Acesso em: 4 abr. 2024.

R CORE TEAM. **R:** The R Project for Statistical Computing. [*S. l.*], 2023. Disponível em: https://www.r-project.org/index.html. Acesso em: 4 abr. 2024.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliar Fertilidade em Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.

RAMOS, C. G.; MEDEIROS, D. S.; GOMEZ, L., OLIVEIRA, L. F. S., SCHNEIDER, I. A. H., KAUTZMANN, R. M. Evaluation of Soil Re-mineralizer from By-Product of Volcanic Rock Mining: Experimental Proof Using Black Oats and Maize Crops. **Natural Resources Research**, New York, v. 29, n. 3, p. 1583–1600, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11053-019-09529-x. Acesso em: 20 out. 2023.

RAMOS, C. G.; QUEROL, X.; DALMORA, A. C.; PIRES, K. C. J.; SCHNEIDER, I. A. H.; OLIVEIRA, L. F. S.; KAUTZMANN, R. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, p. 2700–2706, 2017. Disponível em: https: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.006. Acesso em: 21 nov. 2024.

RAMOS, C. G.; HOWER, J. C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M. L. S.; THEODORO, S. H.. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. **Geoscience Frontiers**, Beijing, v. 13, n. 1, p. 101185, 2022. Disponível em: https: http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185. Acesso em: 3 nov. 2023.

SAKAI, W. S. Simple method for differential staining of paraffin embedded plant material using toluidine blue o. **Stain Technology**, Abingdon, v. 48, n. 5, p. 247–249, 1973.

SANGSTER, A. G.; HODSON, M. J.; TUBB, H. J.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, H. H.; KORNDÖRFER, G. H. Studies in plant science. *In*: **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. v. 8.

SANTOS, E. F.; PONGRAC, P.; REIS, A. R.; WHITE, P. J.; LAVRES, J. Phosphorus–zinc interactions in cotton: consequences for biomass production and nutrient-use efficiency in photosynthesis. **Physiologia Plantarum**, Hoboken, v. 166, n. 4, p. 996–1007, 2019.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Ver. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SATO, S.; COMERFORD, N. B. Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid brazilian Ultisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 685–694, 2005.

SAVVAS, D.; NTATSI, G. Biostimulant activity of silicon in horticulture. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 196, Biostimulants in Horticulture, p. 66–81, 2015.

SILVA, D. R. G.; MARCHI, G.; SPEHAR, C. R.; GUILHERME, L. R. G.; REIN, T. A.; SOARES, D. A.; ÁVILA, F. W. Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 951–962, 2012.

SILVA, L. F. V. **Contribuição do saprolito na estimativa do intemperismo aprimorado de rocha: revisão exploratória e estudo de caso**. 2024. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-02082024-084731/. Acesso em: 22 nov. 2024.

SILVA, D. R. G.; SPEHAR, C. R.; MARCHI, G.; SOARES, D. A.; CANCELLIER, E. L.; MARTINS, E. S. Yield, nutrient uptake and potassium use efficiency in rice fertilized with crushed rocks. **African Journal of Agricultural Research**, Sapele, v. 9, n. 4, p. 455–464, 2014.

SMET, W.; RYBEL, B. D. Genetic and hormonal control of vascular tissue proliferation. **Current Opinion in Plant Biology**, Kidlington, v. 29, Growth and development, p. 50–56, 2016.

SOUZA, W. S. **Uso da rochagem para remineralização de solos de baixa fertilidade**. [*S. l.*], 2019. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/42042. Acesso em: 21 nov. 2024.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 807, p. 150976, 2022. Disponível em: https: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976. Acesso em: 8 jul. 2024.

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

TAMFUH, P. A.; WOTCHOKO, P.; NONO, D. G. K.; NDOFOR, C. N. Y.; NKOUATHIO, D. G.; BITOM, D. Comparative Effects of Basalt Dust, NPK 20-10-10 and Poultry Manure on Soil Fertility and Cucumber (*Cucumis sativus*) Productivity in Bafut (Cameroon Volcanic Line). **Earth Sciences**, New York, v. 8, n. 6, p. 323–334, 2019.

TAYADE, R.; GHIMIRE, A.; KHAN, W.; LAY, L.; ATTIPOE, J. Q.; KIM, Y. Silicon as a Smart Fertilizer for Sustainability and Crop Improvement. **Biomolecules**, Basel, v. 12, n. 8, p. 1027, 2022.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

THEODORO, S. H.; MEDEIROS, F. P.; IANNIRUBERTO, M.; JACOBSON, T. K. B. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 107, p. 103014, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103014. Acesso em: 20 out. 2023.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H.; ROCHA, E.; MACEDO, I.; REGO, K. G. Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study of remineralization of the tucuruí degraded land for agroforest reclamation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 85, p. 23–34, 2013.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Rochagem: uma questão de soberania nacional. *In*: Congresso Brasileiro De Geoquímica, 13., 2011, Gramado. **Anais** [...] [*S. l.: s. n*.], 2011.

TOSCANI, R. G. S.; CAMPOS, J. E. G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. **Geociências**, [*s. l*.], v. 36, n. 2, p. 259–274, 2017.

TUBAÑA, B. S.; HECKMAN, J. R. Silicon in soils and plants. *In*: RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. **Silicon and plant diseases**. [*S. l.: s. n*.], 2015. p. 7–51.

URAK, F.; BILGIC, A.; FLORKOWSKI, W. J.; BOZMA, G. Confluence of COVID-19 and the Russia-Ukraine conflict: Effects on agricultural commodity prices and food security. **Borsa Istanbul Review**, Amsterdam, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.bir.2024.02.008. Acesso em: 8 maio 2024.

U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **Keys to Soil Taxonomy**. 13. ed. [*S. l*.]: Independently Published, 2022.

VIEIRA FILHO, J. E. R. *et al.* **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília, DF: Ipea, 2016. 391 p. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6876. Acesso em: 30 mar. 2024.

WITHERS, P. J. A. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, London, v. 8, n. 1, p. 2537, 2018. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-018-20887-z. Acesso em: 12 out. 2023.

YAMAMOTO, T.; NAKAMURA, A.; IWAI, H.; ISHII, T.; MA, J. F.; YOKOYAMA, R.; NISHITANI, K.; SATOH, S.; FURUKAWA, J. Effect of silicon deficiency on secondary cell wall synthesis in rice leaf. **Journal of Plant Research**, Tokyo, v. 125, n. 6, p. 771–779, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10265-012-0489-3. Acesso em: 9 jun. 2024.

YAN, G.; NIKOLIC, M.; YE, M.; XIAO, Z.; LIANG, Y. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture**, Oxford, v. 17, n. 10, p. 2138–2150, 2018.

ZHANG, G.; KANG, J.; WANG, T.; ZHU, C. Review and outlook for agromineral research in agriculture and climate mitigation. **Soil Research**, Clayton, v. 56, n. 2, p. 113–122, 2017.

ZHANG, L.; GADD, G. M.; LI, Z. Microbial biomodification of clay minerals. *In*: GADD, G. M.; SARIASLANI, S. **Advances in Applied Microbiology,** Maryland Heights, v. 114, p. 111–139, 2021. v. 114, p. 111–139.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DO AGROMINERAL SILICÁTICO REALIZADA PELO LABORATÓRIO CRTI

Mineral	Valores obtidos (%)
Augita	32.11
Labradorita	15.26
Andesina	19.53
Ortoclásio	2.67
Clorita	5.61
Celadonita	4.05
Material de baixa cristalinidade	17.10
Apatita	1.04
Hematita	< LQ
Magnetita	1.31
Ilmenita	< LQ
Ulvoespinelio	0.99
Quartzo	< LQ
Total	99.67

Nota: < LQ: abaixo do limite de quantificação. Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DO AGROMINERAL SILICÁTICO

Peneira (abertura, mm)	% em massa passante
2.00	100.00 ± 1.00
0.84	70.00 ± 0.86
0.30	50.00 ± 0.55

Fonte: Próprio autor.