

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**SUPERFOSFATO SIMPLES EM SUBSTITUIÇÃO AO GESSO AGRÍCOLA:
RENDIMENTO DE GRÃOS E PROPRIEDADES QUÍMICAS EM SOLOS
SUBTROPICAIS SOB PLANTIO DIRETO**

**Dayana Jéssica Eckert
(Dissertação de MESTRADO)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**SUPERFOSFATO SIMPLES EM SUBSTITUIÇÃO AO GESSO AGRÍCOLA:
RENDIMENTO DE GRÃOS E PROPRIEDADES QUÍMICAS EM SOLOS
SUBTROPICAIS SOB PLANTIO DIRETO**

DAYANA JÉSSICA ECKERT
Engenheira Agrônoma (IFPR – Palmas)

Dissertação apresentada como um
dos requisitos à obtenção do Grau
de Mestra em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Eckert, Dayana Jéssica
SUPERFOSFATO SIMPLES EM SUBSTITUIÇÃO AO GESSO
AGRÍCOLA: RENDIMENTO DE GRÃOS E PROPRIEDADES QUÍMICAS
EM SOLOS SUBTROPICAIS SOB PLANTIO DIRETO / Dayana
Jéssica Eckert. -- 2022.
48 f.
Orientador: Tales Tiecher.

Coorientador: Jessé Rodrigo Fink.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2022.

1. Disponibilidade de enxofre. 2. fertilizantes
fosfatados. 3. plantio direto. 4. disponibilidade de
cálcio. 5. acidez superficial. I. Tiecher, Tales,
orient. II. Fink, Jessé Rodrigo, coorient. III.
Título.

DAYANA JÉSSICA ECKERT
Engenheira Agrônoma (IFPR)

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Faculdade de Agronomia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: **31/03/2022**
Pela Banca Examinadora



TALES TIECHER
Orientador-PPG Ciência do Solo

Homologado em: **25/08/2022**
Por



ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo

AMANDA POSSELT MARTINS
UFRGS
(MConf UFRGS)

OSMAR HENRIQUE DE CASTRO PIAS
Instituto Federal Farroupilha
(MConf UFRGS)



THAIS RODRIGUES COSER
Yara Brasil Fertilizantes
(MConf UFRGS)

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

"A vida não é fácil para nenhum de nós. Mas e daí? Nós devemos ter persistência e, acima de tudo, confiança em nós mesmos. Devemos acreditar que somos talentosos em alguma coisa, e que essa coisa, a qualquer custo, deve ser alcançada."

Marie Curie

*Dedico à minha amada tia e amiga
Mariza (in memoriam). Você está
sempre em meus pensamentos e
coração.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Carlos Eckert e Elianes Bacca, por sempre incentivarem meus sonhos, pela liberdade de escolha do meu caminho e entenderem minha ausência durante esses anos. Obrigada por tudo.

À minha mãe, por me ensinar a ser uma mulher forte, a não desistir perante as piores dificuldades e por ser meu alicerce sempre. Obrigada pelo encorajamento e amor incondicional.

Ao meu namorado, melhor amigo e companheiro de vida Gustavo Frosi. Obrigada pelo amor, cuidado, carinho e principalmente pelo apoio nestes quase seis anos. Sou muito grata por dividir a vida e meus sonhos contigo.

À minha família, em especial aos meus avós Amantino, Inêz, José e Lídia, pelo amor incondicional, carinho e apoio em cada fase da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Tales Tiecher, pelo acolhimento, dedicação no ensinar, por todo conhecimento repassado e pelo cuidado e carinho que tem conosco. Obrigada pela paciência, pelo incentivo e por orientar de forma leve, com certeza faz muita diferença no nosso dia a dia. É um privilégio aprender e conviver contigo.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Jessé Rodrigo Fink, pelos ensinamentos desde a graduação, por ter me inserido na pesquisa e ter tido muita paciência comigo sempre. Obrigada pela sua amizade e por continuar fazendo parte do meu crescimento profissional e pessoal. Quero que saiba que é um dos maiores responsáveis por eu ter chegado até aqui. Obrigada por todo incentivo e encorajamento. Serei eternamente grata.

Ao Prof. Dr. Clésio Gianello pelo auxílio em todas as análises realizadas durante o experimento.

Ao Prof. Dr. André Luis Vian pela concessão da área para a implantação do experimento e por todo o auxílio nos trabalhos a campo.

Aos meus amigos de longa data, pelo apoio nas horas difíceis, por entenderem nossos desencontros causados pela distância e por todos os momentos bons que passamos juntos. Graças a vocês a vida é mais leve.

Aos amigos e colegas que encontrei durante o mestrado, e ao grupo de pesquisa IRGEB, pelas conversas, trocas, ajuda e companheirismo nos trabalhos a campo e em laboratório.

Aos alunos de Iniciação Científica Gustavo, Matheus e Vanessa, pela dedicação, auxílio nas atividades, conversas e principalmente pelo companheirismo e amizade que temos. A ajuda de vocês foi e continua sendo essencial.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de ensino público, pela infraestrutura e apoio nos projetos e produções acadêmicas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, por toda dedicação e ensinamentos.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado, que possibilitou a minha permanência no programa.

À Yara Brasil Fertilizantes, pelo apoio e financiamento do projeto.

A todos que de alguma forma ajudaram na minha caminhada até aqui, me possibilitando alcançar mais este objetivo. Sou imensamente grata.

SUPERFOSFATO SIMPLES EM SUBSTITUIÇÃO AO GESSO AGRÍCOLA: RENDIMENTO DE GRÃOS E PROPRIEDADES QUÍMICAS EM SOLOS SUBTROPICAIS SOB PLANTIO DIRETO¹

Autor: Dayana Jéssica Eckert

Orientador: Prof. Dr. Tales Tiecher

Coorientador: Prof. Dr. Jessé Rodrigo Fink

RESUMO

O superfosfato simples (SFS), fonte de P e S, tem sido cada vez mais substituído pelo superfosfato triplo (SFT) – que é mais concentrado em P e não contém S – na agricultura de larga escala devido principalmente ao maior rendimento operacional. Ao mesmo tempo, tem sido cada vez mais frequente observar baixos rendimentos das culturas em áreas de plantio direto devido à deficiência de S e toxicidade de Al em subsuperfície. Nesse cenário, a aplicação de gesso agrícola (CaSO_4) pode aumentar a produtividade de grãos, uma vez que é um sal altamente solúvel que pode servir como fonte de S e como mitigador da toxicidade do Al em maiores profundidades do solo. Apesar disso, poucos estudos procuraram comparar os efeitos do gesso com SFS na resposta das culturas sob plantio direto. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de curto prazo da adição de Ca e S via superfosfato simples (SSP) em cada cultura e via gesso agrícola na produtividade de soja e trigo, e na acidez do solo e disponibilidade de nutrientes em dois solos subtropicais sob plantio direto. Os experimentos foram instalados em um Acrisol e um Ferralsol com a aplicação de cinco doses de gesso (de 0 a 8,0 Mg ha⁻¹) aplicado apenas no início do experimento combinado com superfosfato triplo (TSP) e outro tratamento sem gesso, mas com aplicação do SSP. As propriedades químicas do solo foram avaliadas cinco meses após o início do experimento, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm. A aplicação de gesso aumentou linearmente o teor de S disponível até a profundidade de 40 cm e o teor de Ca trocável apenas na camada de 0-5 cm, em ambos os solos. Taxas acima de 4,0 Mg ha⁻¹ de gesso reduziram o Mg trocável no Acrisol (0-10 cm) e Ferralsol (0-5 cm), e o K disponível no Acrisol (0-5 cm). O uso de SSP foi suficiente para elevar o S disponível acima dos níveis críticos em ambos os solos. No entanto, as produtividades de soja e trigo não foram afetadas pelas doses de gesso ou fontes de P.

Palavras-chave: Disponibilidade de enxofre, plantio direto, disponibilidade de cálcio, fertilizantes fosfatados, acidez subsuperficial.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (36p.) Março, 2022.

SINGLE SUPERPHOSPHATE REPLACING AGRICULTURAL GYPSUM: SHORT-TERM EFFECT ON GRAIN YIELD AND SOIL CHEMICAL PROPERTIES IN SUBTROPICAL SOILS UNDER NO-TILLAGE²

Author: Dayana Jéssica Eckert

Adviser: Prof. Dr. Tales Tiecher

Coadviser: Prof. Dr. Jessé Rodrigo Fink

ABSTRACT

Single superphosphate (SFS), a source of P and S, has been increasingly replaced by triple superphosphate SFT – which is more concentrated in P and does not contain it – in large-scale agriculture mainly due to higher operating yield. At the same time, there are increasing records of low crop levels in no-till areas due to S deficiency and Al toxicity in subsurface yields. In this scenario, the application of agricultural gypsum (CaSO_4) can increase grain yield, since it is a highly insoluble salt that can serve as a source of S and as a mitigator of Al toxicity at greater depths of the soil. Despite this, few studies seek to compare the effects of gypsum with SFS on the response of crops under no-tillage. This study aimed to evaluate the short term effect of Ca and S addition via single superphosphate (SSP) in each crop and via agricultural gypsum on soybean and wheat yield, and on soil acidity and nutrient availability in two subtropical soils under no-tillage. The experiments were established on an Acrisol and on a Ferralsol with the application of five rates gypsum (from 0 to 8.0 Mg ha^{-1}) applied only at the beginning of the experiment combined with triple superphosphate (TSP) and another treatment without gypsum but with application of SSP. Soil chemical properties were evaluated five months after the beginning of the experiment, in the 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm layers. The application of gypsum linearly increased the available S content up to 40 cm depth, and the exchangeable Ca content only in the 0-5 cm layer, in both soils. Rates above 4.0 Mg ha^{-1} of gypsum reduced the exchangeable Mg in the Acrisol (0-10 cm) and Ferralsol (0-5 cm), and the available K in the Acrisol (0-5 cm). The use of SSP was sufficient to raise available S above critical levels in both soil. However, soybean and wheat yields were not affected by gypsum doses or P sources.

Keywords: Sulfur availability, no-till, calcium availability, phosphate fertilizers, subsurface acidity.

² Master's dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (36p.) March, 2022.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 A acidez dos solos e seus efeitos no desenvolvimento das culturas ...	4
2.2 Correção da acidez do solo	5
2.3 A utilização do gesso agrícola	7
2.4 Uso de superfosfato simples como fonte de Ca e S	9
3 HIPÓTESE	11
4 OBJETIVO	12
5 MATERIAL E MÉTODOS	13
5.1 Descrição das áreas de estudo	13
5.2 Desenho experimental	15
5.3 Coleta e análise de solo	17
5.4 Avaliação da produtividade das culturas	18
5.5 Análise estatística	18
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
6.1 Efeito das doses de gesso nas propriedades químicas do solo	19
6.2 Efeito da fonte de fertilizante fosfatado nas propriedades químicas do solo	26
6.3 Produtividade de soja e trigo	28
7 CONCLUSÕES	30
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química inicial do solo nas áreas experimentais em um Argissolo e Latossolo sob plantio direto no estado do Rio Grande do Sul, Sul do Brasil.....	15
Tabela 2. Culturas, cultivares, data de semeadura e quantidade de nutrientes aplicados nas áreas experimentais ao longo dos cultivos.	16
Tabela 3. Quantidade de nutrientes aplicados em cada tratamento até o momento da coleta de solo realizada em abril de 2020, cinco meses após o início dos experimentos em um Argissolo e um Latossolo sob plantio direto no Sul do Brasil.....	17
Tabela 4. Teor de S disponível, Ca e Mg trocável, e relação Ca/Mg no solo em função da aplicação de doses de gesso combinadas com superfosfato triplo (SFT) e a testemunha sem gesso com aplicação de superfosfato simples (SFS) em um Argissolo e um Latossolo sob plantio direto no Sul do Brasil.....	21
Tabela 5. Teor de potássio (K) disponível, fósforo (P) disponível e pH do solo em função da aplicação de doses de gesso combinadas com superfosfato triplo (SFT) e a testemunha sem gesso com aplicação de superfosfato simples (SFS) em um Argissolo e um Latossolo sob plantio direto no Sul do Brasil.....	25
Tabela 6. Capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por cátions e saturação por Al no solo em função da aplicação de doses de gesso combinadas com superfosfato triplo (SFT) e a testemunha sem gesso com aplicação de superfosfato simples (SFS) em um Argissolo e um Latossolo sob plantio direto no Sul do Brasil.....	26

RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização das áreas experimentais nos municípios de Independência e Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil..... 14
- Figura 2** Precipitação e temperatura média mensal dos municípios de Independência e Eldorado do Sul, durante as safras de 2019/2020 e 2020/2021. 14
- Figura 3.** Relação entre o teor de Ca e Mg trocável no solo da camada de 0–10 cm, em função das doses de gesso agrícola aplicadas em um Argissolo e um Latossolo no estado Rio Grande do Sul. Teores críticos de Ca e Mg segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2016). 22
- Figura 4.** Relação entre o teor de Ca trocável e K disponível no solo da camada de 0-10 cm em função das doses de gesso agrícola aplicadas em um Argissolo e um Latossolo, no estado Rio Grande do Sul. Teores críticos de Ca e K segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2016). 23
- Figura 5.** Teor de S disponível no solo em função da aplicação de superfosfato simples (SFS) e superfosfato triplo (SFT), na ausência de aplicação de gesso agrícola, em um Argissolo Vermelho em Eldorado do Sul (**A**) e em um Latossolo Vermelho em Independência (**B**) até a profundidade de 40 cm. Barras indicam o desvio padrão. * comparando as fontes de P em cada camada indicam diferenças significativas pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a $p < 0,05$. ns, não significativo..... 27
- Figura 6.** Produtividade da cultura da soja nas safras 2019/2020 e 2020/2021 em um Argissolo e Latossolo, e produtividade do trigo na safra 2020 no Argissolo, em função da aplicação de doses de gesso combinadas com SFT e testemunha sem gesso com aplicação de SFS. Valores entre parênteses indicam a dose de gesso agrícola (em Mg ha^{-1}). ns = médias da testemunha sem gesso e com SFS (T1) não se diferenciaram das doses de gesso agrícola combinadas com SFT. A regressão entre as doses de gesso agrícola não foi significativa. 29

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento de terras utilizadas para o setor agrícola, a busca por uma produção sustentável é cada vez maior. Aumentar a produtividade das áreas, além da recuperação de áreas degradadas é ponto chave para o aumento da produção, sem a necessidade de migrar para novas áreas. Para que isso ocorra é preciso manejar adequadamente a fertilidade do solo, visando suprir a demanda nutricional das culturas de forma que estas possam expressar seu máximo potencial produtivo. Além disso, busca-se produzir de forma sustentável, sem que haja a degradação do solo das áreas agrícolas e efeitos prejudiciais ao ambiente. Um grande avanço para a conservação dos solos foi a implantação do sistema de plantio direto (SPD). Adotado, no Brasil principalmente, a partir da década de 1990, tem o objetivo de fazer a manutenção da estrutura do solo e a cobertura vegetal, a fim de diminuir as perdas de solo, principalmente, por erosão hídrica.

O sucesso do SPD depende de uma adequada implantação, na qual é importante o diagnóstico da acidez e disponibilidade de nutrientes do solo. Quando necessário, a correção da acidez do solo deve ser realizada até 20 cm de profundidade, para garantir um bom volume de solo adequado ao desenvolvimento das plantas. Entretanto, muitas áreas de SPD consideradas consolidadas, não foram corretamente corrigidas na sua implementação e por isso apresentam produtividade baixa devido aos problemas relacionados com acidez em subsuperfície. O não revolvimento do solo e a aplicação de calcário em superfície nessas áreas, forma uma frente alcalinizante no solo, fazendo com que a neutralização da acidez do solo ocorra de forma rápida nas primeiras camadas, mas muitas vezes muito lenta em maiores profundidades. Em pH baixo (<5,5), pode ocorrer a presença de teores tóxicos de alumínio

trivalentes (Al^{3+}), o que limita o crescimento radicular, sendo um entrave para o desenvolvimento das culturas. Assim, pode haver um menor volume de solo explorado pelo sistema radicular em profundidade, diminuindo a absorção de nutrientes e água pela planta, principalmente em condições de déficit hídrico, acarretando baixas produtividades.

O gesso agrícola é comumente utilizado como um mitigador da acidez em profundidade nos solos devido à sua maior solubilidade em comparação ao calcário. As respostas positivas das culturas ao uso do gesso podem ser devido à adição de Ca ao solo através do condicionante, que aumenta rapidamente seu teor no solo, diminuindo a atividade do alumínio Al^{3+} , e possibilitando o crescimento das raízes. Ainda, o gesso agrícola fornece enxofre (S) ao solo na forma de sulfato (SO_4^{2-}) que está prontamente disponível para as plantas. O S é um elemento essencial para as plantas, visto que participa de inúmeras reações fisiológicas e bioquímicas além de influenciar em processos como a fixação biológica de nitrogênio e a síntese proteica em tecidos vegetativos e produtivos das plantas. Entretanto, com o uso de fertilizantes mais concentrados, que não possuem S em sua composição, a menor deposição atmosférica pelo controle de emissão de gases de efeito estufa, e a maior demanda das culturas, sua deficiência se torna cada vez mais comuns nas áreas agrícolas. Como resultado, nota-se uma maior resposta das culturas a fertilização fosfatada.

Apesar dos possíveis efeitos positivos no desenvolvimento das culturas, o uso de gesso agrícola em doses elevadas pode acarretar deficiência induzida de outros nutrientes. Alguns elementos, como o magnésio (Mg) e o potássio (K) podem ser deslocados das cargas do solo pelo excesso de Ca adicionado. Uma vez na solução do solo, esses cátions, através de par iônico formado com o sulfato, e serem migrados para outras camadas, impossibilitando a absorção destes pelas plantas. Outro ponto a ser observado no uso do gesso, é o fornecimento de S em uma única aplicação. O SO_4^{2-} é um ânion de média a alta mobilidade no solo, sendo facilmente migrado nas camadas do solo podendo ser perdido por lixiviação. A adição de doses elevadas de S ao solo, em única aplicação via gesso, aumenta o seu teor no solo rapidamente, mas como as plantas não conseguem absorver todo o sulfato, grande parte do nutriente fica propenso a perdas do sistema por

lixiviação. Isso faz com que o teor de S no solo diminua em um curto período nas camadas superficiais do solo, não havendo a manutenção da sua disponibilidade para as culturas ao longo dos anos.

Grande parte do gesso utilizado na agricultura é oriundo de indústrias de fertilizantes fosfatados. Na produção do superfosfato simples (SFS) o sulfato de cálcio continua presente no fertilizante, que apresenta em sua composição 8% de S e 16% de Ca, além, é claro, do fósforo (P). A substituição de fertilizantes mais concentrados em P pelo SFS, pode servir de fonte destes nutrientes ao solo da mesma forma que o gesso. Ainda, a sua aplicação anual, faz com que este incremento seja parcelado, o que pode diminuir os problemas com a lixiviação de Mg e K, ocasionado pelas doses altas de gesso, além de manter a disponibilidade adequada de S no solo. Sendo assim, esse estudo buscou investigar o uso de SFS como um potencial substituto ao gesso agrícola no fornecimento de Ca e S ao solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A acidez dos solos e seus efeitos no desenvolvimento das culturas

Dos solos utilizados para agricultura no Brasil, estima-se que 70% sejam naturalmente ácidos (QUAGGIO, 2000), como consequência dos intensos processos de intemperismo durante a formação destes solos. Em regiões tropicais e subtropicais, com chuvas intensas, clima quente e com relevos que permitem a movimentação da água no solo, o processo de hidrólise ocorre de forma moderada a forte, resultando em maior dessilicatação dos minerais do solo, permanecendo principalmente minerais do tipo 1:1 e óxidos de Al e ferro (Fe). Durante este processo, ocorre a liberação de cátions na solução do solo, e alguns destes formam compostos mais solúveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) que migram com maior facilidade para camadas mais profundas, podendo ser lixiviados. Porém, outros formam compostos de baixa solubilidade, como o Al e o Fe, que acabam sendo acumulados no solo (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2019; MEURER; BISSANI; CARMONA, 2017). Um exemplo destes solos são os da classe dos Argissolos e dos Latossolos. Juntas, essas duas classes somam a maior parte dos solos utilizados na agricultura no Brasil e no Estado do Rio Grande do Sul. Estes, apesar de suas diferenças em textura e mineralogia na camada superficial, têm em comum baixa fertilidade e acidez natural, pelo seu avançado estado de intemperismo (FAGERIA; NASCENTE, 2014; SANTOS et al., 2018).

Além do processo de formação dos solos, a acidificação pode ocorrer a partir da ação de microrganismos e manejos realizados. No solo, ocorre constante processo de equilíbrio em busca da eletroneutralidade. Para isso, ocorrem constantes trocas de íons entre a solução do solo com a fase sólida, microrganismos e as plantas. Quando um cátion ou ânions é absorvido pela

planta, suas raízes liberam na rizosfera íons H^+ ou OH^- para manter este equilíbrio (GOULDING, 2016; HAO et al., 2020). A liberação de íons H^+ é observada mais intensamente em leguminosas, por serem mais eficientes na absorção de Ca e Mg, contribuindo mais para a acidificação do solo durante a fixação biológica de N e a atividade fotossintética (KUZYAKOV; RAZAVI, 2019). Também as raízes das plantas fazem constante liberação de exsudatos que são oxidados pelos microrganismos, além de aumentar a taxa de respiração microbiana, gerando mais íons H^+ para a solução (GOULDING, 2016; RAZA et al., 2020). Ainda, durante a decomposição dos resíduos vegetais pelos microrganismos, pelo processo de mineralização, também ocorre a liberação de íons H^+ que levam ao aumento da acidez do solo (ALMAGRO et al., 2021).

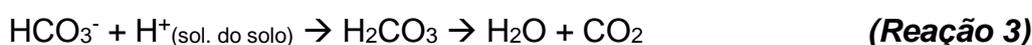
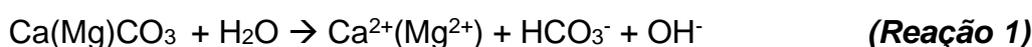
Em condições de pH do solo inferior a 5,5, o pode ocorrer a presença de Al em sua forma tóxica às culturas (Al^{3+}), que atua como uma barreira química, inibindo o desenvolvimento das raízes em profundidade no solo (FARIA et al., 2021). Isso porque a presença do Al^{3+} promove alterações no desenvolvimento fisiológico das raízes das principais culturas agrícolas. São observadas mudanças no número e posicionamento das células, danos no DNA, progressão do ciclo e diferenciação celular e inibição da absorção de Ca (CHAFFAI; MARZOUK; EL FERJANI, 2005; JIAN et al., 2008; MATTIELLO et al., 2010; RANGEL; RAO; HORST, 2009). A má formação das raízes faz com que seu crescimento seja comprometido, limitando a exploração do solo. Desta forma diminui a absorção de nutrientes e água pela planta, principalmente em épocas de déficit hídrico (DALLA NORA; AMADO, 2013; PIAS et al., 2020; TIECHER et al., 2018; ZANDONÁ et al., 2015).

Para atender a demanda das culturas anuais que fazem parte do sistema de rotação de culturas nessas áreas, é essencial construir uma fertilidade adequada através do aumento do pH, neutralização do Al^{3+} , aumento da saturação de cátions (Ca, Mg, K) e da disponibilidade de nutrientes (ZANDONÁ et al., 2015).

2.2 Correção da acidez do solo

A correção do solo tem o objetivo de neutralizar cátions de reações ácidas no solo através de materiais com poder neutralizante, como os carbonatos, óxidos, hidróxidos e silicatos de Ca ou Mg (SOUSA; MIRANDA;

OLIVEIRA, 2007; ZANDONÁ et al., 2015). O calcário é o produto mais utilizado na agricultura, originado da moagem de rochas calcárias que possuem em sua composição o carbonato de cálcio (CaCO_3) e carbonato de magnésio (MgCO_3). Esse material ao ser solubilizado forma bicarbonato (HCO_3^-) e libera hidroxilas (OH^-) que neutralizam o H^+ que está na solução do solo (**Reações 1, 2, 3 e 4**). A partir disso o pH do solo é elevado afetando diretamente as propriedades químicas do solo, o Al^{3+} é precipitado em forma sem efeito fitotóxico e aumenta disponibilidade de nutrientes para as plantas (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007; SPARKS, 2003; SPOSITO, 2008).



Em solos ácidos e com presença de Al^{3+} em profundidade, a forma mais rápida e efetiva de corrigir a acidez do solo é através da calagem sucedida do revolvimento do solo e incorporação até 20 cm de profundidade (BELLINASSO et al., 2021; BORTOLUZZI et al., 2014; MIOTTO et al., 2020). Porém, com o rápido crescimento da área cultivada sob o sistema plantio direto no Brasil a partir dos anos de 1990, a calagem passou a ser feita superficialmente, sem incorporação mecânica imediata, visando preservar o estoque de C e a estrutura do solo (FUENTES-LLANILLO et al., 2021). Para culturas como soja e trigo, o pH buscado pela calagem é de 5,5 – 6,0 na camada de 0-10 cm. A correção do solo feita pela calagem, ocorre através de uma frente alcalinizante, ou pela migração do corretivo por bioporos do solo até camadas mais profundas. Em áreas em que o SPD foi implementado sem a devida correção ou em locais onde ocorreu a acidificação do solo, a calagem, em curto prazo, tem seu efeito restrito aos primeiros centímetros de profundidade. Sendo assim, impossibilita a correção da acidez e eliminação do Al^{3+} em subsuperfície, além de não aumentar os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em profundidade (CONDON; BURNS; LI, 2020; RHEINHEIMER et al., 2018a, 2018b).

2.3 A utilização do gesso agrícola

O uso do gesso agrícola vem aumentando nas últimas décadas, com objetivo de melhorar o ambiente subsuperficial do solo em áreas sob sistema plantio direto (PIAS et al., 2020; TIECHER et al., 2018; ZAMBROSI; ALLEONI; CAIRES, 2007). Grande parte do gesso agrícola utilizado é subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados, mas pode também ser obtido a partir de jazidas naturais (**Reação 5**). Estima-se que a cada 100 kg de ácido fosfórico produzidos, são gerados, aproximadamente, 450 kg de gesso, que, por muito tempo, foi um resíduo sem grande utilidade na indústria de fertilizantes (JORIS et al., 2013).



Durante a solubilização do gesso agrícola não ocorre a liberação de íons hidroxilas ou carbonatos, o que não afeta o pH do solo. Todavia, o gesso é uma excelente fonte de Ca (20%) e possui uma solubilidade maior que a do calcário. Em média, 1500 mm de chuva é capaz de solubilizar até 40 toneladas de gesso agrícola ao ano, enquanto, este mesmo volume de chuva solubiliza apenas 2 toneladas de calcário. Com isso, a sua aplicação superficial tem o potencial de incrementar rapidamente o teor de Ca em profundidade, o que diminui a atividade do Al^{3+} e o potencial de toxidez para as plantas, garantindo um ambiente subsuperficial mais adequado para o desenvolvimento das raízes (ALVES et al., 2021; FONTOURA et al., 2019). O maior desenvolvimento radicular em camadas mais profundas aumenta a absorção de nutrientes e água, diminuindo os prejuízos em condições de déficit hídrico (PIAS et al., 2020). Além de Ca, o gesso agrícola também é fonte de enxofre (S) (15-18%), na forma de sulfato prontamente disponível para a absorção das plantas.

O S é um macronutriente secundário essencial, sendo o nutriente mais requerido para a produção agrícola após o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K). Tem participação em inúmeros compostos e reações nas plantas e funções que determinam a produção e qualidade do produto vegetal (HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2007; JAMAL; MOON; ABDIN, 2010; VITTI et al., 2018). A sua exigência pelas culturas é variada conforme a espécie e o rendimento. Leguminosas de forma geral são mais exigentes em quantidade de

S do solo, em relação a gramíneas, visto que possuem um teor mais elevado de proteínas. O S está diretamente ligado ao metabolismo do N na planta, convertendo o N não proteico em proteína, além de ter grande papel na nodulação e fixação biológica de N (VITTI et al., 2018). Porém, em condições de alto rendimento em biomassa associado à baixa disponibilidade do nutriente no solo, é observado resposta de gramíneas à adubação sulfatada em doses semelhantes ou mesmo superiores a leguminosas (ALVAREZ et al., 2007).

Cerca de 95% do S presente no solo encontra-se na matéria orgânica, o qual é preciso ser oxidado para a formação de sulfatos para a absorção das plantas. Em solos com avançado estágio de intemperismo e com baixo teor de matéria orgânica, a deficiência em S é maior. Entretanto, nas últimas décadas, foi observado aumento nos relatos de deficiência de S que levam a efeitos negativos na produtividade das culturas (MASCAGNI; HARRISON; PADGETT, 2008; SCHERER, 2009). O menor teor de S em solos agrícolas se deve ao efeito combinado de maior controle de emissões de gases de efeito estufa, principalmente aos de uso de combustíveis fósseis, que diminui a deposição atmosférica de S, do uso de fertilizantes concentrados em P e N, com pouco ou sem S em sua composição. Além disso, ainda há a questão de aumento da produtividade das culturas ao longo do tempo, que resulta em maior probabilidade de resposta das culturas às adições de S (ALVAREZ et al., 2007; CAIRES et al., 1998; MASCHIETTO, 2009; PIAS et al., 2019; RAMPIM et al., 2011; ZANDONÁ et al., 2015). Apesar de sua importância no maior rendimento das culturas, o S é, na maioria das vezes, pouco considerado nos planos de manejo da adubação de culturas responsivas, como a soja e o trigo.

Atualmente no Brasil, a tomada de decisão para a aplicação de gesso é baseada nos valores de Al e Ca trocável no solo e saturação por Al (m%). No Cerrado e no Estado do Paraná, a gessagem é recomendada quando a m% se encontrar $\geq 20\%$, e teores de Al^{3+} e Ca^{2+} forem $\geq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $\leq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, na camada de 20-40 cm (PAULETTI; MOTTA, 2017; SOUSA; LOBATO, 2004). Entretanto, em recentes estudos, onde foram avaliadas as respostas das culturas de grãos em SPD à aplicação de gesso na América Latina, foi observado que os critérios para a tomada de decisão devem ser diferentes e devem também considerar o tipo da cultura e a ocorrência de déficit hídrico (PIAS et al., 2020). Esses autores encontraram que os cereais

respondem positivamente ao gesso quando a saturação por Al^{3+} excede 5% na camada de 20-40 cm de solo. Já para a soja, a resposta à aplicação do gesso agrícola é observada quando, na mesma camada, a saturação por Al^{3+} for maior que 10% e com a ocorrência de déficit hídrico.

A dose de gesso agrícola, quando necessária, é normalmente calculada baseada no teor de argila do solo (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999; SOUSA; LOBATO, 2004). Recentemente, a dose também tem sido calculada baseado no teor e na saturação de Ca na CTC (CAIRES; GUIMARÃES, 2018). Contudo, nem o teor de argila, tampouco teor e a saturação de Ca têm apresentado boa relação com o máximo rendimento econômico das culturas no Sul do Brasil (TIECHER et al., 2018). A obtenção de métodos eficazes de recomendação que considerem as distintas regiões e necessidades das culturas é de extrema importância. A aplicação de gesso agrícola em condições não necessárias, aumenta os custos de produção e pode causar a perda de nutrientes das camadas superficiais do solo por lixiviação. O efeito é observado principalmente para o magnésio (Mg^{2+}) com a utilização de altas doses do condicionante, principalmente quando esta é feita sem a correção adequada do solo (CAIRES et al., 1998, 2004). O Ca^{2+} liberado durante a sua solubilização do gesso, pode deslocar íons adsorvidos com menor força das cargas do solo (*i.e.*, K e Mg) para a solução, que podem formar pares iônicos com SO_4^{2-} resultando em uma maior mobilidade ao longo do perfil (DIAS, 1992). Este efeito pode ser mais expressivo em solos arenosos, visto que possuem menor quantidade de argilominerais e matéria orgânica, tendo assim menor quantidade de cargas que serão rapidamente ocupadas pelo Ca^{2+} , podendo ocorrer uma deficiência induzida de K e Mg (JALALI; ROWELL, 2009).

2.4 Uso de superfosfato simples como fonte de Ca e S

Outra forma de adicionar Ca e S ao solo é através de fertilizantes menos concentrados, mas que contenham valores significativos destes elementos em sua composição. O superfosfato simples (SFS) possui, em média, 7,9% de P, que é menor que a concentração em outros fertilizantes fosfatados, como o superfosfato triplo (SFT; 42%) e fosfatados amoniacais (MAP 50% - 54%; DAP 38% – 40%). Porém, durante a sua produção, o sulfato de cálcio não é removido, o que lhe confere cerca de 16% de Ca e 8% de S em

sua composição, quantidades semelhantes às encontradas no gesso (KULAIF, 1999). Dessa forma, o uso anual do SFS pode incrementar o teor desses nutrientes no solo, sem haver a necessidade de adição de gesso agrícola para esse propósito. Devido a mobilidade do sulfato no solo, a adição de SFS em cada cultivo pode também ser uma estratégia interessante para fornecer S às culturas, ao invés de uma aplicação única de gesso agrícola que poderia resultar em grandes perdas por lixiviação em apenas alguns meses (TIECHER et al., 2019). Apesar disso, existem poucos estudos que comparam o efeito da utilização do gesso agrícola com a utilização de diferentes fontes de fertilizante fosfatado. Estudos utilizando baixas doses de gesso ($<1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), e avaliando seu potencial de fornecimento de S, também são escassos, porém necessários, uma vez que, em doses muito elevadas de gesso agrícola se torna difícil distinguir se o efeito das respostas das culturas é devido ao fornecimento de S ou devido à diminuição da toxidez de Al^{3+} em subsuperfície (PIAS et al., 2020; TIECHER et al., 2018).

3 HIPÓTESE

O uso de superfosfato simples como fonte de P, a curto prazo em cada cultivo, promove o incremento de Ca e S fazendo a manutenção destes nutrientes no solo de forma mais sincronizada com a demanda das culturas de soja e trigo, em solos subtropicais, vindo a substituir a aplicação de gesso agrícola.

4 OBJETIVO

O objetivo do estudo foi avaliar os efeitos de curto prazo da adição de Ca e S via aplicação de superfosfato simples em cada cultivo e via aplicação única de gesso agrícola na distribuição vertical de nutrientes no solo, nas propriedades químicas relacionadas com a acidez do solo e na produtividade de soja e trigo, sob sistema plantio direto em um Latossolo e um Argissolo no Sul do Brasil.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição das áreas de estudo

Foram conduzidos dois experimentos a campo no Estado do Rio Grande do Sul (RS), região sul do Brasil, durante as safras de 2019/2020 e 2020/2021: um no município de Eldorado do Sul (30° 5' 9" S e 51° 37' 5" W), em um Argissolo Vermelho com 223 g kg⁻¹ de argila na camada de 0-10 cm (**Figura 1**), e outro em Independência (30° 1' 40" S e 51° 13' 43" W), em um Latossolo Vermelho, com 617 g kg⁻¹ de argila na camada de 0-10 cm. As áreas estão sob sistema de plantio direto desde 2000 e 2002, respectivamente.

O clima de ambas as áreas é classificado como Cfa (clima subtropical, com verão úmido e quente), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (ALVARES et al., 2013), com precipitação média anual de 1.077 mm e 1.382 mm, em Eldorado do Sul e Independência, respectivamente (WREGGE et al., 2012). Durante o período do experimento, a precipitação cumulativa em nos municípios dos experimentos foi de 3128 mm e 2038 mm, em Independência e Eldorado do sul, respectivamente (**Figura 2**).

Em novembro de 2019, anteriormente à instalação dos experimentos, foi realizada a caracterização química dos dois solos nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm (**Tabela 1**). Na camada superficial (0-10 cm) de ambos os solos, os teores de Mg trocável, P disponível e K disponível se encontravam em níveis altos antes da implantação do experimento (CQFS-RS/SC, 2016). Entretanto, o pH se encontrava inferior a 5,5 e o teor de S e Ca estava abaixo do nível crítico no Argissolo (PIAS et al., 2019; MANUAL DE ADUBAÇÃO).

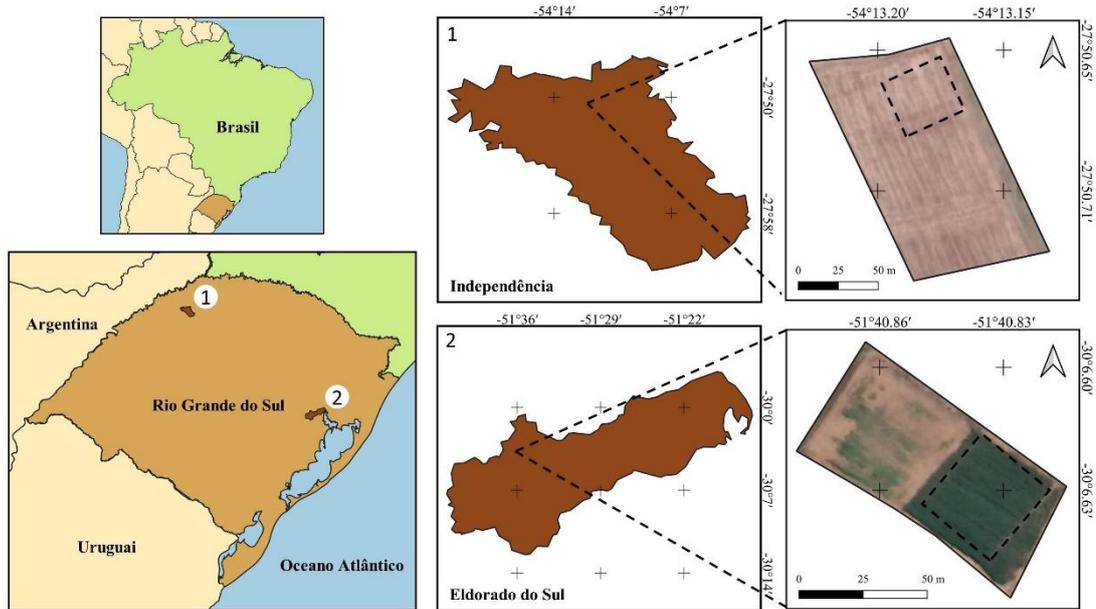


Figura 1. Localização das áreas experimentais nos municípios de Independência e Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

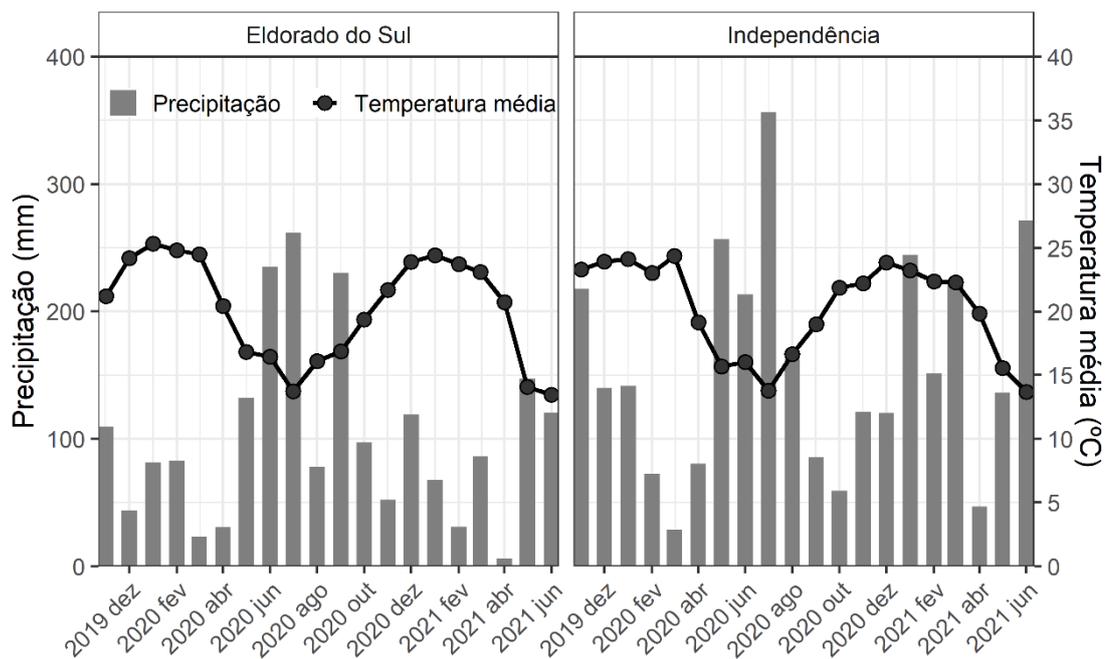


Figura 2. Precipitação e temperatura média mensal dos municípios de Independência e Eldorado do Sul, durante as safras de 2019/2020 e 2020/2021. (INMET, 2022).

Tabela 1. Caracterização química inicial do solo nas áreas experimentais em um Argissolo e Latossolo sob plantio direto no Rio Grande do Sul, Sul do Brasil.

Propriedade do solo	Argissolo Vermelho Eldorado do Sul			Latossolo Vermelho Independência		
	0-10	10-20	20-40	0-10	10-20	20-40
	----- cm -----					
Argila (g kg ⁻¹)	223	247	259	617	689	702
Silte (g kg ⁻¹)	604	523	494	49	36	38
Areia (g kg ⁻¹)	173	229	247	334	276	260
pH-H ₂ O (1:1, v/v)	5,1	5,0	4,6	5,5	5,4	5,3
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	4,7	5,6	9,7	5,2	5,1	4,6
P disponível (mg dm ⁻³) ¹	38,6	28,9	15,8	12,0	2,7	1,5
K disponível (mg dm ⁻³) ¹	232,0	137,0	110,0	154,0	29,0	23,0
Al trocável (cmol _c dm ⁻³) ²	0,2	0,4	0,9	0,0	0,0	0,0
Ca trocável (cmol _c dm ⁻³) ²	2,8	2,1	1,7	6,7	5,2	4,9
Mg trocável (cmol _c dm ⁻³) ²	1,5	1,1	0,9	2,9	2,2	2,2
S disponível (mg dm ⁻³) ³	4,8	4,4	9,2	7,8	11,9	26,1
Zn disponível (mg dm ⁻³)	1,7	0,3	0,2	1,6	0,5	0,3
Cu disponível (mg dm ⁻³)	0,4	0,5	0,7	4,3	6,1	7,5
Mn trocável (cmol _c dm ⁻³)	4,4	3,0	2,3	25,0	28,0	28,5
Relação Ca/Mg	1,9	1,8	1,9	2,3	2,4	2,3
Cátions trocáveis (cmol _c dm ⁻³) ⁴	4,9	3,5	2,9	10,0	7,4	7,1
CTC efetiva (cmol _c dm ⁻³) ⁵	5,1	3,9	3,9	10,0	7,4	7,2
CTC a pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³) ⁶	9,6	9,1	12,6	15,2	12,5	11,7
Saturação por cátions (V%) ⁷	52,0	40,0	27,0	65,0	60,0	61,0
Saturação por Al (m%) ⁸	4,0	12,0	24,0	0,0	0,0	0,0

¹Extração com Mehlich-1; ²Extração com NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹; ³Extração com Ca₃(PO₄)₂ 500 mg L⁻¹; ⁴Soma dos cátions Ca, Mg e K; ⁵CTC_{efetiva} = Ca + Mg + K + Al; ⁶CTC_{pH 7,0} = Ca + Mg + K + (H + Al); ⁷V (%) = (Soma dos cátions/CTC_{pH 7,0}) x 100; ⁸m (%) = (Al/CTC_{efetiva}) x 100.

5.2 Desenho experimental

A instalação dos experimentos foi realizada em novembro de 2019 com a aplicação dos tratamentos, que consistiram na aplicação única de doses de gesso agrícola e diferentes fertilizantes fosfatados. As doses de gesso foram escolhidas de acordo com os estudos prévios realizados por Pias et al. (2020) e Tiecher et al. (2018), correspondendo à faixa de doses onde há maior probabilidade de respostas das culturas, sendo 0, 0,5, 1, 2, 4 e 8 Mg ha⁻¹, em aplicação superficial única, em pré-semeadura da soja. O gesso agrícola utilizado possuía em sua composição 13% de S, 16% de Ca e 0,3% de P. Nesses tratamentos, as doses de gesso agrícola foram combinadas com a aplicação de superfosfato triplo (SFT) como fonte de P. Adicionou-se o tratamento sem aplicação de gesso, recebendo apenas superfosfato simples (SFS) (denominado de tratamento testemunha). O gesso foi aplicado em uma única vez, na

implantação do experimento, de forma superficial. Os fertilizantes fosfatados também foram aplicados superficialmente em todas as parcelas em cada cultivo. Em ambos os experimentos, as doses de N, P e K adicionadas em cada cultivo foram estabelecidas seguindo as recomendações da CQFS-RS/SC (2016), e apresentadas na **Tabela 2**. Em todos os tratamentos e nos dois experimentos foram utilizados os fertilizantes ureia (45% N) e KCl (48% K) em cobertura como fontes de N e K, respectivamente. Os tratamentos foram dispostos em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, em parcelas de 9 m x 5 m. O resumo das culturas, cultivares, data de semeadura e colheita em ambas as áreas experimentais é apresentado na **Tabela 2**. A quantidade de Ca, S e P aplicado em cada tratamento via gesso agrícola e via fertilização até o momento da coleta de solo realizada em abril de 2020, cinco meses após o início dos experimentos, é apresentada na **Tabela 3**.

Tabela 2. Culturas, cultivares, data de semeadura e quantidade de nutrientes aplicados nas áreas experimentais ao longo dos cultivos.

Local/solo	Data de semeadura	Cultura	Cultivar	N P K			Data de colheita
				(kg ha ⁻¹)			
Eldorado do Sul, Argissolo	18/11/2019	Soja	Brasmax Ícone	0	26	83	29/04/2020
	04/06/2020	Trigo	BRS Bela Jóia	70	20	25	09/11/2020
	30/11/2020	Soja	BRS 5601 RR	0	26	83	22/04/2021
Independência, Latossolo	20/11/2019	Soja	Pioneer 95R51	0	26	75	21/03/2020
	16/05/2020	Trigo	BRS Bela Jóia	80	22	42	*
	10/12/2020	Soja	Basf 15B70	0	26	83	12/04/2021

*Experimento não foi colhido, em função de dano por geada.

Tabela 3. Quantidade de nutrientes aplicados em cada tratamento até o momento da coleta de solo realizada em abril de 2020, cinco meses após o início dos experimentos em um Argissolo e um Latossolo sob plantio direto no Sul do Brasil.

Fonte de P	Dose de gesso (Mg ha ⁻¹)	Via gesso agrícola ^A (kg ha ⁻¹)			Via fertilização ^{B,C} (kg ha ⁻¹)			Total (kg ha ⁻¹)		
		S	Ca	P	S	Ca	P	S	Ca	P
SFS	0	0	0	0	33,3	53	26,2	33,3	53,3	26,2
SFT	0	0	0	0	0	13	26,2	0	14,3	26,2
SFT	0,5	65	80	1,5	0	13	26,2	65	94,3	27,7
SFT	1,0	130	160	3,1	0	13	26,2	130	174,3	29,3
SFT	2,0	260	320	6,1	0	13	26,2	260	334,3	32,3
SFT	4,0	520	640	12,2	0	13	26,2	520	654,3	38,4
SFT	8,0	1040	1280	24,5	0	13	26,2	1040	1294,3	50,7

^A Concentração de nutrientes no gesso agrícola: 16% de Ca, 13% de S e 3% de P.

^B Concentração de nutrientes no superfosfato triplo: 42% de P e 10% de Ca.

^C Concentração de nutrientes no superfosfato simples: 18% de P, 16% de Ca e 10% de S.

5.3 Coleta e análise de solo

Em abril de 2020, cinco meses após o início do experimento e após a colheita do primeiro cultivo de soja (**Tabela 2**), amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm. A coleta foi realizada entre as linhas de semeadura, com pá de corte até a profundidade de 20 cm, e com trado calador na profundidade de 20-40 cm. As amostras foram secas em estufa de ar forçado a 50 °C, moídas, peneiradas em malha de 2 mm e reservadas para posterior análise.

O pH em água foi medido em uma suspensão com relação 1:1 (v/v) de solo e água destilada. Na mesma suspensão, foi feita leitura do pH após a adição da solução SMP na relação 1:1:0,5, para estimar a acidez potencial do solo (H+Al) baseada na equação proposta por Kaminski et al. (2001). A extração de Ca, Mg e Al trocáveis foi feita com NH₄Cl 1,0 mol L⁻¹ (Adaptado de Tedesco et al., 1995). Os teores disponíveis de P e K foram extraídos com Mehlich-1, e o S disponível foi extraído com fosfato de cálcio 500 mg L⁻¹ (TEDESCO et al., 1995). Posteriormente, os teores de Al, Ca, Mg, P, K e S nos extratos foram quantificados por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). A capacidade de troca de cátions potencial a pH 7 (CTC_{pH7}) foi estimada pela soma de Ca, Mg, K e H+Al. A saturação por cátions (V%) foi calculada pela relação [(Ca+Mg+K)/CTC_{pH7}] x 100. A saturação por Al (m%) foi calculada pela relação [Al/(Ca+Mg+K+Al)] x 100 (CQFS-RS/SC, 2016).

5.4 Avaliação da produtividade das culturas

A produtividade da soja foi avaliada pela colheita manual de área útil de 5,4 m². Para o trigo, foi utilizada colhedora de parcelas, numa área útil de 5,5 m². Os dados de rendimentos de grãos foram corrigidos para 130 g kg⁻¹ de umidade. Em Independência (RS), em 2020, não foi realizada colheita de trigo, em função dos danos causados pela geada na fase de florescimento.

5.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e à homogeneidade das variações pelo teste de Levene ($p < 0,05$), utilizando o software R Studio. Para avaliar as diferentes doses de gesso agrícola, foi realizada a análise de regressão (PROC REG) no aplicativo SAS® 9.4. Os efeitos das fontes de P (SFS e SFT) nos tratamentos sem gesso agrícola, para cada parâmetro de solo em cada camada e para as produtividades foram comparados pelo teste *U* de Mann-Whitney (teste não paramétrico) ($p < 0,05$).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Efeito das doses de gesso nas propriedades químicas do solo

A aplicação de gesso agrícola aumentou linearmente a concentração de S disponível no solo em todas as camadas avaliadas e nos dois locais de estudo (**Tabela 4**). Este incremento de S nas camadas mais profundas (10-20 e 20-40 cm), apesar do curto período entre a aplicação e análise do solo (5 meses), ocorreu em vista da solubilidade do condicionante. Neste período houve um acúmulo de precipitação de 260 mm e 462 mm, em Eldorado do Sul e Independência respectivamente, volume de chuva suficiente para solubilização de quase todo gesso aplicado. Além disso, o gesso fornece S na forma de SO_4^{2-} , que possui boa mobilidade no solo. A especiação iônica da solução do solo durante 109 dias após a aplicação de doses de gesso agrícola em um Argissolo do Sul do Brasil demonstrou que mais de 90% do S na solução do solo encontra-se na forma de sulfato livre, que possui grande mobilidade no solo (TIECHER et al., 2019). Além disso, o sulfato é fornecido juntamente com o Ca^{2+} , e esses íons formam um par iônico neutro que pode ser percolado facilmente no solo (SORATTO; CRUSCIOL, 2008). O SO_4^{2-} possui maior mobilidade em solos arenosos que possuem fase sólida mineral com menor quantidade de grupos funcionais capazes de adsorver esse íon. Entretanto, foi observado maior incremento de S em profundidade no solo mais argiloso (Latossolo). Isso pode estar relacionado ao volume de chuva durante o ciclo da cultura, que pode ter contribuído na migração do íon em profundidade (**Figura 2**) e aos menores valores de pH do Argissolo (Eldorado do Sul), o que pode ter aumentado a adsorção de SO_4^{2-} e, então, diminuído sua movimentação no perfil do solo.

O teor de Ca trocável no solo também aumentou proporcionalmente com a dose de gesso agrícola aplicada, nos dois solos (**Tabela 4**). Porém, esse incremento foi observado somente na camada de 0-5 cm. O efeito restrito à camada mais superficial do solo pode estar relacionado ao curto período entre a aplicação do gesso e a amostragem de solo.

A aplicação de gesso não aumenta a quantidade de cargas no solo e, por isso, o incremento de Ca na superfície promove o deslocamento de outros cátions, como o Mg e o K, que estavam previamente adsorvidos nos grupos funcionais da fase sólida do solo (FURTINI et al., 2001). Isso faz com que o Ca fique retido nas cargas do solo e sua migração para camadas mais profundas seja mais lenta. Esse efeito pode ser observado pela diminuição no teor de Mg trocável na camada de 0-10 cm no Argissolo e na camada de 0-5 cm no Latossolo nos tratamentos que receberam a aplicação de doses de gesso (**Tabela 4**).

Quando deslocado para a solução do solo, o Mg, assim como o Ca, forma par iônico com o sulfato, o que aumenta o seu potencial de lixiviação (CAIRES; JORIS; BLUM, 2011). O Mg possui menor afinidade pelos grupos funcionais do solo devido ao seu maior raio iônico hidratado em relação ao Ca e, por isso, é facilmente removido dos sítios de troca para a solução na presença de altas concentrações de Ca (ZAMBROSI; ALLEONI; CAIRES, 2007). É importante ressaltar que, apesar da diminuição nos teores de Mg ocorrerem em ambos os solos, somente no Argissolo este decréscimo atingiu níveis abaixo dos considerados adequados para o desenvolvimento das culturas ($1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) na camada de 0-10 cm (CQFS-RS/SC, 2016), nas doses maiores que $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso (**Figura 3**). Apesar das doses de $4,0$ e $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso agrícola terem aumentado os teores de Ca na camada de 0-10 cm no Argissolo acima do teor crítico ($4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (CQFS-RS/SC, 2016), os resultados obtidos no presente estudo evidenciam que aplicação de gesso agrícola em solos arenosos deve ser realizada com cautela para evitar a deficiência induzida de Mg às plantas, em função do excesso de Ca no solo (ALVES et al., 2021). Apesar de solos argilosos serem mais resilientes, devido à maior quantidade de sítios capazes de reter esses cátions, a deficiência induzida de Mg também tem sido observada com certa frequência em Latossolos argilosos do sul do Brasil,

quando aplicadas doses superiores a 6,0 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola (CAIRES; JORIS; BLUM, 2011; VICENSI et al., 2016; FONTOURA et al., 2019).

Tabela 4. Teor de S disponível, Ca e Mg trocável, e relação Ca/Mg no solo em função da aplicação de doses de gesso combinadas com superfosfato triplo (SFT) e a testemunha sem gesso com aplicação de superfosfato simples (SFS) em um Argissolo e um Latossolo sob plantio direto no Sul do Brasil.

Camada (cm)	Sem gesso + SFS	Dose de gesso (Mg ha ⁻¹) + SFT						Equação	R ²
		0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0		
Teor de S disponível no solo (mg dm⁻³)									
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul									
0-5	23,8	5,6 [↓]	36,2	70,8 [↑]	131,5 [↑]	343,6 [↑]	553,3 [↑]	y = 70,903x + 6,997	0,98
5-10	7,8	4,0 [↓]	11,8	22,2 [↑]	46,7 [↑]	71,7 [↑]	83,9 [↑]	y = -1,8271x ² + 24,901x + 1,6982	0,99
10-20	7,6	4,4 [↓]	15,1	27,0 [↑]	43,7 [↑]	68,7 [↑]	78,9 [↑]	y = -1,7031x ² + 22,899x + 4,6709	0,99
20-40	14,0	9,2 [↓]	19,5	24,2 [↑]	37,9 [↑]	87,2 [↑]	78,0 [↑]	y = -2,2072x ² + 27,128x + 3,9396	0,94
Latossolo Vermelho, Independência									
0-5	17,1	8,3 [↓]	38,7	50,6 [↑]	103,4 [↑]	281,2 [↑]	539,2 [↑]	y = 68,046x - 5,5516	0,99
5-10	11,0	7,4 [↓]	16,9	26,5 [↑]	52,6 [↑]	86,6 [↑]	145,7 [↑]	y = 17,36x + 11,095	0,99
10-20	10,9	11,9	21,3	26,9 [↑]	40,1 [↑]	78,2 [↑]	104,0 [↑]	y = 11,798x + 16,565	0,96
20-40	26,0	26,1	25,2	28,5	48,9	55,1 [↑]	93,8 [↑]	y = 8,686x + 23,851	0,97
Teor de Ca trocável no solo (cmol_e dm⁻³)									
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul									
0-5	2,8	2,8	3,2	3,8	4,0	6,6 [↑]	10,8 [↑]	y = 1,0031x + 2,6028	0,99
5-10	2,2	2,8	2,2	2,4	2,5	3,1	3,2	ns	-
10-20	2,0	2,1	2,0	2,1	2,1	2,5	2,1	ns	-
20-40	1,4	1,7	1,7	1,9	1,7	2,0	2,0	ns	-
Latossolo Vermelho, Independência									
0-5	7,4	7,3	7,5	8,5	8,6	9,1 [↑]	13,5 [↑]	y = 0,74x + 7,1574	0,94
5-10	6,3	6,0	6,6	6,7	7,2	6,6	7,4	ns	-
10-20	5,5	5,2	6,1	5,5	5,8	5,7	6,3	ns	-
20-40	4,8	4,9	5,6	5,3	5,0	5,6	5,8	ns	-
Teor de Mg trocável no solo (cmol_e dm⁻³)									
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul									
0-5	1,4	1,5	1,2	1,0	1,0	0,7 [↓]	0,7 [↓]	y = 0,0183x ² - 0,2297x + 1,3573	0,87
5-10	1,3	1,5	1,2	1,2	1,3	1,0	0,8	y = -0,0729x + 1,3527	0,80
10-20	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	0,8	ns	-
20-40	0,8	0,9	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9	ns	-
Latossolo Vermelho, Independência									
0-5	3,4	3,3	3,3	3,3	2,9	2,4 [↓]	2,0 [↓]	y = -0,0882x + 1,111	0,86
5-10	2,6	2,5	3,0	2,7	3,1	2,4	2,3	ns	-
10-20	2,2	2,2	2,7	2,2	2,4	2,3	2,5	ns	-
20-40	2,2	2,2	2,6	2,2	2,2	2,2	2,5	ns	-
Relação Ca/Mg trocável									
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul									
0-5	2,0	1,9	2,7 [↑]	3,9 [↑]	4,3 [↑]	9,2 [↑]	17,3 [↑]	y = 1,9413x + 1,5363	0,99
5-10	1,7	1,8	1,9	2,0 [↑]	1,9 [↑]	3,3 [↑]	4,3 [↑]	y = 0,3282x + 1,6924	0,95
10-20	1,7	1,8	1,9	1,8	1,8	2,5 [↑]	2,7 [↑]	y = 0,1298x + 1,7578	0,88
20-40	1,8	1,9	2,0	1,8	1,8	2,5	2,2	ns	-
Latossolo Vermelho, Independência									
0-5	2,2	2,2	2,0	2,6 [↑]	2,9 [↑]	3,9 [↑]	5,9 [↑]	y = 0,4896x + 1,9954	0,99
5-10	2,4	2,4	2,3	2,5	2,4	2,8 [↑]	3,2 [↑]	y = 0,1088x + 2,3204	0,92
10-20	2,5	2,4	2,3	2,5	2,4	2,5	2,5	ns	-
20-40	2,2	2,3	2,2	2,4	2,3	2,5	2,3	ns	-

[↓]Valor menor que a testemunha (sem gesso com aplicação de SFS) pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a uma significância de p<0,05. [↑]Valor maior que a testemunha sem gesso com aplicação de SFS pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a uma significância de p<0,05. ns, não significativo.

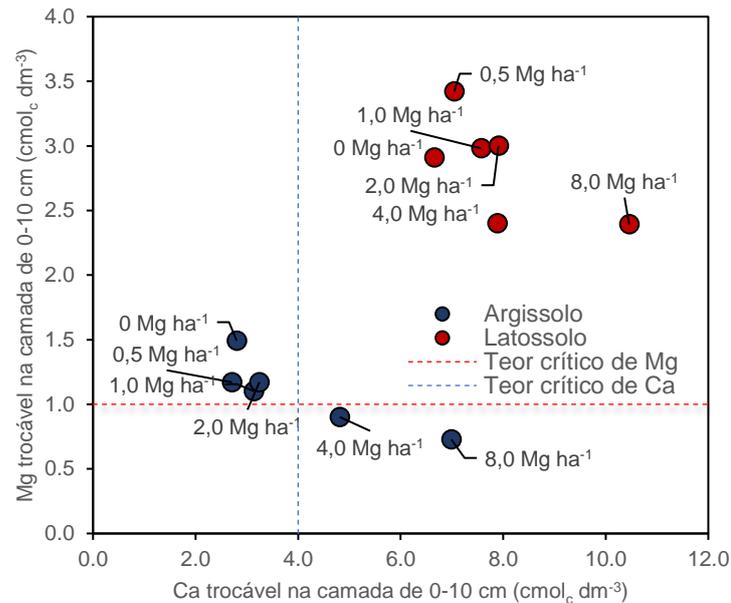


Figura 3. Relação entre o teor de Ca e Mg trocável no solo da camada de 0–10 cm, em função das doses de gesso agrícola aplicadas em um Argissolo e um Latossolo no Rio Grande do Sul. Teores críticos de Ca e Mg segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2016).

É sabido que não existe um valor ideal da relação Ca/Mg trocável do solo estabelecido para culturas de grãos em plantio direto, desde que seus teores estejam acima dos níveis de suficiência no solo (BENITES et al., 2010; OLIVEIRA, 1993; PAULETTI, 2020). Mesmo assim, é possível verificar o grande impacto que a aplicação de doses elevadas de gesso agrícola causa nessas relações como consequência das alterações nos teores de Ca e Mg após a aplicação de gesso agrícola. A relação Ca/Mg trocável do solo aumentou em todas as doses (**Tabela 4**) e nas camadas superficiais (até 20 cm no Argissolo e até 10 cm no Latossolo). O maior incremento na relação Ca/Mg foi observado no Argissolo, com destaque para as doses de gesso de 4,0 e 8,0 Mg ha⁻¹. Essa maior relação é decorrente do maior incremento de Ca e diminuição dos teores de Mg que ocorreram neste solo e nas camadas de 0-5 e 5-10 cm.

No Argissolo, houve diminuição nos teores de K na camada de 0-5 cm do solo, que foi proporcional ao aumento da dose de gesso agrícola aplicada (**Tabela 5**), o que corrobora com os resultados encontrados por Rampim et al. (2011), onde observaram a redução no teor de K na camada de 0-10 cm aos 12 meses após a aplicação do gesso. O deslocamento do K também é provocado

pela adição de excesso de Ca em superfície (**Figura 4**). Entretanto, a diminuição do K só foi observada no Argissolo, que possui uma CTC_{pH7} cerca de 37% menor que o Latossolo (**Tabela 1**). Mesmo com essa diminuição, os teores de K permaneceram acima dos teores críticos em ambos os solos, que é de 90 e 120 $mg\ dm^{-3}$ para o Argissolo e o Latossolo, respectivamente (CQFS-RS/SC, 2016), como pode ser observado na **Figura 4**. É importante destacar que a calagem antecedente a aplicação de gesso agrícola, é primordial para diminuir o potencial de perda de K e Mg por lixiviação em solos submetidos à aplicação de altas doses de gesso agrícola, pois promove o aumento da CTC e maior adsorção de Mg e K nos colóides do solo (FURTINI et al., 2001).

O teor de P disponível no solo da camada superficial (0-5 cm) aumentou linearmente com as doses de gesso agrícola aplicadas no Argissolo (**Tabela 5**), efeito semelhante ao reportado por Caires et al. (2003, 2011) Este incremento está relacionado ao P contido no gesso agrícola como impureza (aproximadamente 0,3% de P). O efeito não foi tão evidente no Latossolo. Nestes solos, pelo alto teor de argila e óxidos de ferro, a capacidade máxima de adsorção de P é maior, do que em solos em que apresentam poucos destes minerais. Sendo assim, o P adicionado ao Latossolo pelo gesso, é rapidamente adsorvido, o que não ocorre no Argissolo (FINK et al., 2016).

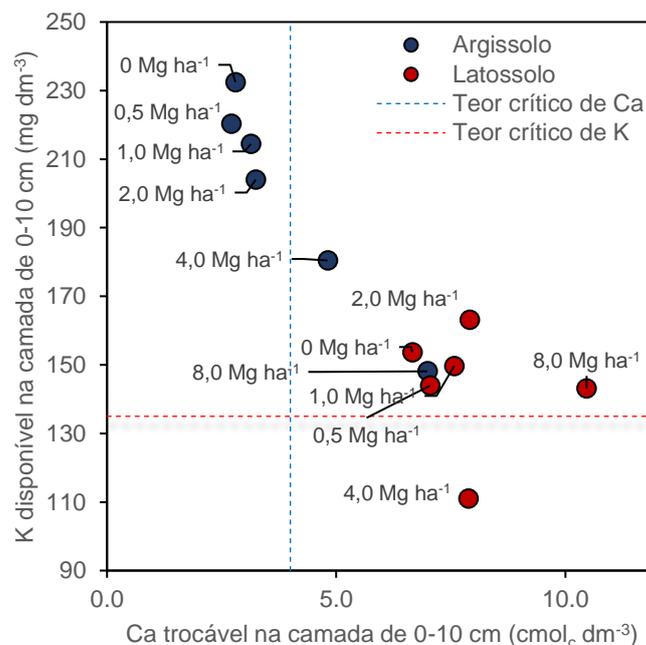


Figura 4. Relação entre o teor de Ca trocável e K disponível no solo da camada de 0-10 cm em função das doses de gesso agrícola aplicadas em um Argissolo

e um Latossolo, no Rio Grande do Sul. Teores críticos de Ca e K segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (2016).

O pH em água do solo no Argissolo diminuiu nas camadas de 5–10 e 10–20 cm com o aumento das doses de gesso agrícola (**Tabela 5**). Este pode ser um efeito indireto da absorção de Ca pelas raízes, de forma diretamente proporcional às doses de gesso agrícola aplicadas. Nas camadas onde se observou a redução do pH, é onde ocorre o maior desenvolvimento e distribuição das raízes. A absorção de cátions pelas plantas envolve a liberação de íons H⁺ para a solução do solo, como forma de balancear a carga dos cátions absorvidos. Além disso, devido ao processo de fixação biológica de nitrogênio pelas leguminosas, como a soja, a absorção de cátions como Ca e Mg, é mais eficiente em relação a gramíneas, e portanto, a liberação de íons H⁺ é maior (KUZUYAKOV; RAZAVI, 2019).

Apesar de vários trabalhos demonstrarem diminuição da saturação por Al e aumento da saturação por cátions devido à aplicação de gesso agrícola no solo (BOSSOLANI et al., 2020; DALLA NORA et al., 2017; FONTOURA et al., 2019), no presente estudo as saturações por Al e por cátions não foi significativamente afetada pela aplicação de gesso agrícola (Tabela 6). Esse resultado pode ser devido ao curto período de tempo entre a aplicação desse condicionador e a coleta de solo (DALLA NORA et al., 2017). No Argissolo, foi observado aumento no valor de CTC pH7 com as doses de gesso aplicadas. Esta alteração pode estar relacionada com o alto incremento de S e Ca ao solo pelo condicionante. Solos argilosos, como o Argissolo do estudo, geralmente, possuem menor quantidade de minerais de óxidos em sua composição. Com altas doses de gesso agrícola foram adicionadas quantidades expressivas de sulfato, que podem saturar rapidamente os sítios de adsorção. A saturação destes pode levar a alterações nas cargas de superfície dos minerais (BARROS Bissani e Camargo, 2020; ZHUANG; YU, 2002), aumentando o saldo de carga negativa, o que também aumenta expressivamente a adsorção de cátions, como o Ca.

Tabela 5. Teor de potássio (K) disponível, fósforo (P) disponível e pH do solo em função da aplicação de doses de gesso combinadas com superfosfato triplo (SFT) e a testemunha sem gesso com aplicação de superfosfato simples (SFS) em um Argissolo e um Latossolo sob plantio direto no Sul do Brasil.

Camada (cm)	Sem gesso + SFS	Dose de gesso (Mg ha ⁻¹) + SFT						Equação	R ²	
		0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0			
Teor de K disponível no solo (mg dm⁻³)										
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul										
0-5	289	284	249	234 [↓]	220 [↓]	192 [↓]	140 [↓]	$y = 1,1466x^2 - 19,016x + 271,55$	0,92	
5-10	199	181	192	194	188	169	157 [↓]		ns	-
10-20	143	138	132	145	138	123	118		ns	-
20-40	104	110	120	100	107	87	121		ns	-
Latossolo Vermelho, Independência										
0-5	172	225	201	196	176	144	171	ns	-	
5-10	70	82	87	103	151	78	115	ns	-	
10-20	29	29	32	37	46	37	60	ns	-	
20-40	25	23	22	24	27	23	26	ns	-	
Teor de P disponível no solo (mg dm⁻³)										
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul										
0-5	40,5	36,2	54,5	53,3	49,9	52,9 [↑]	70,2 [↑]	$y = 2,6188x + 47,128$	0,75	
5-10	26,9	34,7	56,9	45,1	26,9	32,9	69,6 [↑]		ns	-
10-20	17,1	28,9	35,7	26,6	17,6	22,5	27,6		ns	-
20-40	5,9	15,8	8,6	8,6	6,9	7,7	18,4		ns	-
Latossolo Vermelho, Independência										
0-5	13,0	15,8	18,5	17,9	18,2	18,4	20,8 [↑]	ns	-	
5-10	14,8	8,2	11,4	7,9	13,1	8,3	8,3	ns	-	
10-20	3,8	2,7	3,9	2,7	3,7	3,7	3,0	ns	-	
20-40	1,7	1,5	1,1	1,3	1,4	1,2	1,2	ns	-	
pH do solo em água										
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul										
0-5	4,9	5,1	4,7	4,6	4,6	4,6	4,6	ns	-	
5-10	4,9	5,1	4,8	4,7	4,6	4,5	4,4	$y = -0,069x + 4,8788$	0,66	
10-20	4,8	5,0	4,7	4,6	4,5	4,5	4,4			
20-40	4,3	4,6	4,4	4,4	4,3	4,3	4,2	$y = -0,049x + 4,7538$	0,62	
Latossolo Vermelho, Independência										
0-5	5,7	5,6	5,8	5,8	5,6	5,6	5,5	ns	-	
5-10	5,3	5,4	5,5	5,4	5,7	5,3	5,3	ns	-	
10-20	5,4	5,4	5,6	5,4	5,4	5,2	5,4	ns	-	
20-40	5,3	5,3	5,6	5,4	5,4	5,4	5,5	ns	-	

[↓]Valor menor que a testemunha (sem gesso com aplicação de SFS) pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a uma significância de $p < 0,05$. [↑]Valor maior que a testemunha sem gesso com aplicação de SFS pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a uma significância de $p < 0,05$. ns, não significativo.

Isso pode ser observado pelos valores de V%, que, mesmo não tendo mostrado diferença significativa entre as doses, teve um aumento de 60% com a dose de 8 Mg ha⁻¹, incrementando a CTC do solo. Além disso, ocorreu o efeito combinado de aumento do teor de Ca com diminuição dos teores de K e Mg nas camadas mais superficiais do solo, resultando em saturação por macronutrientes catiônicos semelhante entre os tratamentos.

Tabela 6. Capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por macronutrientes catiônicos e saturação por Al no solo em função da aplicação de doses de gesso combinadas com superfosfato triplo (SFT) e a testemunha sem gesso com aplicação de superfosfato simples (SFS) em um Argissolo e um Latossolo sob plantio direto no Sul do Brasil.

Camada (cm)	Sem gesso + SFS	Dose de gesso (Mg ha ⁻¹) + SFT						Equação	R ²
		0,0	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0		
CTC_{pH7,0} do solo (cmol_c dm⁻³)									
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul									
0-5	12,6	11,6	12,4	12,4	12,8	14,3	18,7 [†]	y = 0,8657x + 9,6288	0,97
5-10	11,3	11,2	11,9	11,6	12,0	12,6	13,2 [†]	y = 0,2338x + 9,6523	0,91
10-20	11,6	10,9	11,1	10,7	11,1	11,4	11,9	ns	-
20-40	14,1	13,9	14,2	12,8	15,2	14,7	15,1	ns	-
Latossolo Vermelho, Independência									
0-5	17,2	17,9	17,2	17,6	18,1	17,4	22,3 [†]	ns	-
5-10	16,0	16,2	16,5	16,7	16,7	16,2	17,2	ns	-
10-20	15,2	14,4	15,1	14,9	14,4	15,0	15,5	ns	-
20-40	14,3	13,6	15,3	14,3	14,3	14,2	14,7	ns	-
Saturação por macronutrientes catiônicos (%)									
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul									
0-5	40	44	40	44	43	55	64 [†]	ns	-
5-10	36	43	33	36	36	37	34	ns	-
10-20	30	33	31	33	33	36	30	ns	-
20-40	18	23	20	25	19	23	22	ns	-
Latossolo Vermelho, Independência									
0-5	65	63	69	69	66	68	73	ns	-
5-10	56	54	58	58	64	57	58	ns	-
10-20	52	52	58	52	57	54	57	ns	-
20-40	49	53	55	53	51	56	57	ns	-
Saturação por Al (%)									
Argissolo Vermelho, Eldorado do Sul									
0-5	3	3	8	2	1	3	3	ns	-
5-10	11	4	13	7	5	9	11	ns	-
10-20	16	12	16	12	11	12	20	ns	-
20-40	35	24	30	23	31	26	30	ns	-
Latossolo Vermelho, Independência									
0-5	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	ns	-
5-10	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	ns	-
10-20	0,0	0,0	1,3	0,4	0,1	0,1	0,1	ns	-
20-40	0,4	0,5	1,0	0,1	1,9	0,0	0,4	ns	-

[†]Valor menor que a testemunha (sem gesso com aplicação de SFS) pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a uma significância de p<0,05. [†]Valor maior que a testemunha sem gesso com aplicação de SFS pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a uma significância de p<0,05. ns, não significativo.

6.2 Efeito da fonte de fertilizante fosfatado nas propriedades químicas do solo

Nos tratamentos sem aplicação de gesso agrícola, apenas o teor de S disponível no solo foi afetado pelas fontes de P utilizadas (SFS e SFT). Observa-se que o SFS aumentou o teor de S disponível até a camada de 10 cm de profundidade, no Latossolo Vermelho, e até 40 cm de profundidade, no Argissolo Vermelho (**Figura 5**).

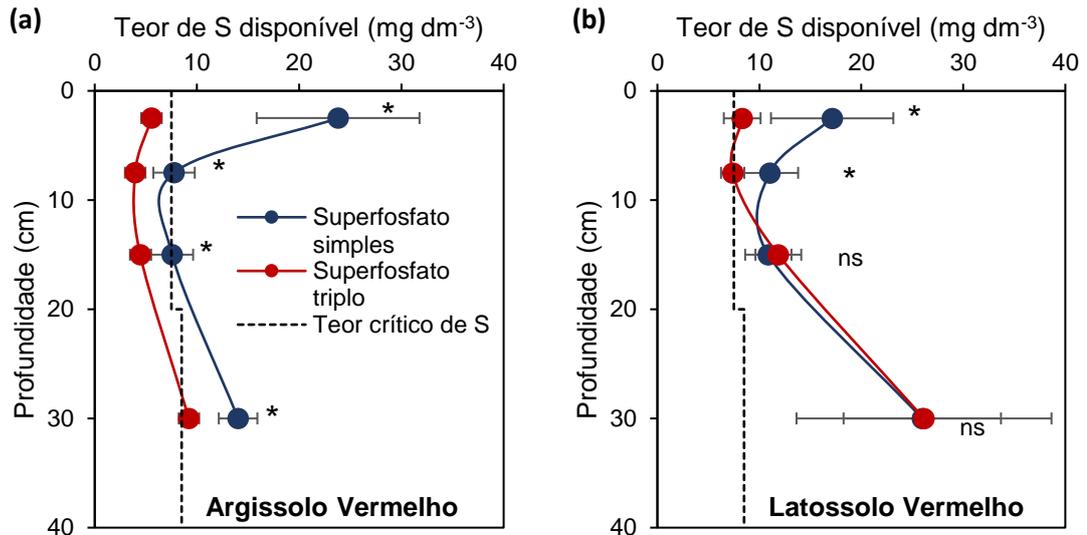


Figura 5. Teor de S disponível no solo em função da aplicação de superfosfato simples (SFS) e superfosfato triplo (SFT), na ausência de aplicação de gesso agrícola, em um Argissolo Vermelho em Eldorado do Sul **(A)** e em um Latossolo Vermelho em Independência **(B)** até a profundidade de 40 cm. Barras indicam o desvio padrão. * diferença significativa pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney a $p < 0,05$ entre as fontes de P. ns, não significativo.

O maior teor de S disponível em ambos os solos no tratamento com SFS é resultante do S presente na composição do SFS, o que mostra o seu potencial na rápida disponibilização deste nutriente. No Argissolo, a reserva inicial de S era baixa (**Tabela 1**), tendo um aumento considerável no seu teor com a aplicação do fertilizante. No Latossolo, o aumento de S disponível com o uso de SFS ocorreu até a camada de 20 cm do solo, sem efeito para maiores profundidades. Isto ocorre porque solos argilosos possuem maior quantidade de cargas, em comparação aos arenosos, os quais podem ser ocupados tanto por fosfato ou sulfato, dependendo do pH do solo e da concentração destes ânions. Com a aplicação de SFS ao solo, estão sendo adicionados os dois ânions ao mesmo tempo, sendo que, no sistema de plantio direto. O P é um ânion com grande afinidade pelos óxidos do solo, sendo preferencialmente adsorvido em relação ao sulfato. Ao adicionar o SFS, rapidamente, as cargas do solo são ocupadas pelo P e o sulfato que não é adsorvido acaba migrando para camadas mais profundas (CASAGRANDE et al., 2003). Por outro lado, em subsuperfície, a concentração de P é menor em plantio direto em comparação com o sistema convencional (TIECHER et al., 2017), o que diminui a competição pelas cargas do solo. Além disso, geralmente o pH do solo nestas camadas é mais ácido do

que na superfície, o que aumenta a preferência pela adsorção de SO_4^{2-} .

O S disponível no Latossolo previamente à implantação do experimento foi de $9,2 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0-20 cm (**Tabela 1**), considerado acima do nível crítico ($7,5 \text{ mg dm}^{-3}$) para as culturas de grãos sob plantio direto no Brasil observado na revisão sistemática de Pias et al. (2019). Por outro lado, no Argissolo, o S disponível antes da instalação do experimento estava abaixo do nível crítico ($4,6 \text{ mg dm}^{-3}$) e a utilização do SFS sem aplicação de gesso agrícola foi suficiente para elevar o teor de S disponível acima do nível crítico neste solo.

6.3 Produtividade de soja e trigo

As doses de gesso e as fontes de P não tiveram efeito sobre a produtividade da soja nas duas safras avaliadas, em ambos os solos, e na produtividade do trigo, em uma safra avaliada no Argissolo (**Figura 6**). Estudos recentes indicam que existe a probabilidade de resposta no incremento da produtividade das culturas a aplicação de gesso agrícola quando a saturação por Al no solo está maior que 10% e 5% para soja e trigo, respectivamente, na camada de 20-40 cm (PIAS et al., 2020), sendo que essa resposta ainda pode ser maior em casos de déficit hídrico. O Latossolo, inicialmente, não possuía problemas com acidez ou saturação por Al em subsuperfície. Além disso, o teor de S no solo estava acima do nível considerado crítico para a soja ($7,5 \text{ mg dm}^{-3}$; PIAS et al., 2019). Considerando esse cenário, era esperado que a produtividade da soja, ao menos nas primeiras safras, não fosse influenciada pelas doses de gesso ou pela adição de S via SFS neste solo.

Era esperado que os tratamentos com SFS e gesso agrícola resultassem em aumento de produtividade da soja e do trigo no Argissolo, pois o teor de S disponível estava abaixo do ideal e a saturação por Al na camada de 20-40 cm era maior que 20%. A cultura da soja é menos responsiva à aplicação de gesso do que as poáceas por ser mais eficiente em absorver Ca da solução do solo e possuir menor exigência do N do solo (CAIRES et al., 2011; VICENSI et al., 2016). Em relação ao S, o estoque no solo e a deposição atmosférica podem ter sido suficientes para suprir a baixa necessidade do nutriente pela cultura (PIAS et al., 2019). Na região central do Rio Grande do Sul, a deposição

atmosférica anual é de 4,5 kg ha⁻¹ (TIECHER et al., 2013). Portanto, considerando a exportação média de S de 2,9 kg Mg⁻¹ de grãos de soja (FILIPPI et al., 2021), somente a deposição atmosférica anual já seria suficiente para repor a quantidade de S exportada em 1,6 Mg ha⁻¹ de soja.

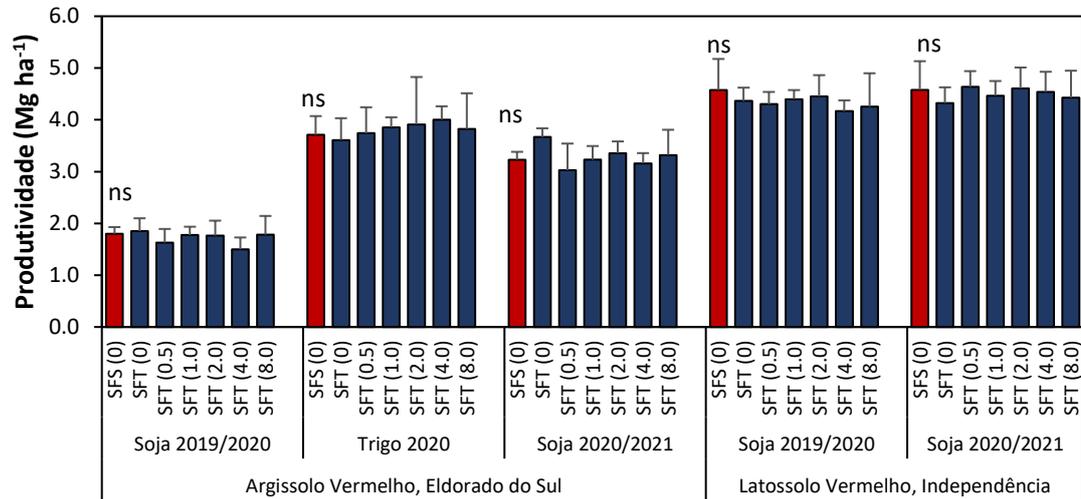


Figura 6. Produtividade da cultura da soja nas safras 2019/2020 e 2020/2021 em um Argissolo e Latossolo, e produtividade do trigo na safra 2020 no Argissolo, em função da aplicação de doses de gesso combinadas com SFT e testemunha sem gesso com aplicação de SFS. Valores entre parênteses indicam a dose de gesso agrícola (em Mg ha⁻¹). ns = médias da testemunha sem gesso e com SFS (T1) não se diferenciaram das doses de gesso agrícola combinadas com SFT. A regressão entre as doses de gesso agrícola não foi significativa.

Finalmente, os resultados da análise detalhada do solo, cinco meses após o estabelecimento dos dois experimentos, demonstram que os principais nutrientes afetados por essas diferentes estratégias de manejo de nutrientes são o S e Ca. Em menor grau, também afeta a disponibilidade de K e Mg, mas nenhum efeito de curto prazo na saturação de Al foi detectado. Fica evidente que para manter a disponibilidade de S no solo acima do nível crítico e evitar suas perdas por lixiviação, o uso de SFS parece ser uma estratégia interessante. Entretanto, a continuação desse estudo a médio e longo prazo, é necessário, visando esgotar o S do sistema e detectar a resposta das culturas à adição do nutriente.

7 CONCLUSÕES

O superfosfato simples, além de ser utilizado como fonte de P, tem se mostrado uma fonte eficiente em aumentar o teor de S disponível no solo, sendo este aumento observado em menor profundidade no Latossolo (até 20 cm) comparado com o Argissolo (até 40 cm) após uma única aplicação. Além disso, a adubação fosfatada com superfosfato simples foi suficiente para aumentar o teor de S disponível no solo acima do nível crítico em ambos os locais. Somente com aplicação de doses de gesso maiores que $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, foi possível obter teores de S disponível no solo maiores que os obtidos com a aplicação de superfosfato simples sem gesso.

Doses de $4,0$ e $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso agrícola reduzem os teores de Mg trocável e K disponível nas camadas superficiais (0–10 cm) de ambos os solos. Apesar disso, as produtividades da soja nas duas safras e nos dois experimentos avaliados, assim como a produtividade do trigo em uma safra avaliada no Argissolo, não se diferenciaram entre as doses de gesso aplicadas e a testemunha sem e com a aplicação de superfosfato simples.

Esses resultados de curto prazo demonstram que o uso de superfosfato simples em cada cultura é uma estratégia interessante para promover o aumento da disponibilidade de S no solo. No entanto, a falta de resposta das lavouras pode ter ocorrido porque, o S disponível do solo anterior a aplicação dos tratamentos, combinado com a deposição atmosférica de S, pode ter sido suficiente para atender a demanda das culturas. Estudos de longo prazo devem ser continuados para detectar a resposta das culturas em um cenário de redução de S do sistema e avaliar de forma mais precisa a entrada de S atmosférico nas áreas.

REFERÊNCIAS

- ALMAGRO, M. *et al.* Plant residue chemical quality modulates the soil microbial response related to decomposition and soil organic carbon and nitrogen stabilization in a rainfed Mediterranean agroecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 156, [art.] 108198, [p. 1-10], Mar. 2021.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVAREZ, V. H. *et al.* Enxofre. *In*: NOVAES, R. F. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 595–644.
- ALVES, L. A. *et al.* Soil chemical properties and crop response to gypsum and limestone on a coarse-textured Ultisol under no-till in the Brazilian Pampa biome. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 25, [art.] e00372, June 2021.
- BARROS, Y. J.; BISSANI, C. A.; CAMARGO, F. A. O. Adsorção de Cu, Zn e P em solos adubados com dejetos animais. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 11, n. 7, p. 437-477, dez. 2020.
- BELLINASSO, R. J. S. *et al.* Crop yields in no-tillage are severely limited by low availability of P and high acidity of the soil in depth. **Soil Research**, Collingwood, v. 60, n. 1, p. 33-49, 2021.
- BENITES, V. M. *et al.* Potássio, cálcio e magnésio na agricultura brasileira. *In*: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010. p. 100–130.
- BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 1, p. 262–271, 2014.
- CAIRES, E. F. *et al.* Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 27–34, 1998.
- CAIRES, E. F. *et al.* Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 275–286, 2003.
- CAIRES, E. F. *et al.* Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 125–136, 2004.
- CAIRES, E. F. *et al.* Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 2, p. 209–216, 2011.

CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 110, n. 5, p. 1987–1995, 2018.

CAIRES, E. F.; JORIS, H.; BLUM, S. C. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 27, p. 45–53, 2011.

CASAGRANDE, J. C. *et al.* Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 1, p. 51–59, 2003.

CHAFFAI, R.; MARZOUK, B.; EL FERJANI, E. Aluminum mediates compositional alterations of polar lipid classes in maize seedlings. **Phytochemistry**, London, v. 66, n. 16, p. 1903–1912, 2005.

CONDON, J.; BURNS, H.; LI, G. The extent, significance and amelioration of subsurface acidity in southern New South Wales, Australia. **Soil Research**, Collingwood, v. 59, n. 1, p. 1–11, 2020.

CQFS-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. [S. l.]: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 5, p. 1393–1403, 2013.

DIAS, L. E. **Uso de gesso como insumo agrícola**. Seropédica: EMBRAPA-CNPBS, 1992. 6 p. (Comunicado técnico, 7).

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of soil acidity of south american soils for sustainable crop production. *In*: SPARKS, D. L. (ed.). **Advances in agronomy**. San Diego: Elsevier, 2014. (Book series, v. 128). cap. 6, p. 221–275.

FARIA, J. M. S. *et al.* Aluminium, iron and silicon subcellular redistribution in wheat induced by manganese toxicity. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 18, [art.] 8745, 2021.

FILIPPI, D. *et al.* Concentration and removal of macronutrients by soybean seeds over 45 years in Brazil: a meta-analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 45, [art.] e0200186, 2021.

FINK, J. R. *et al.* Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 62–68, 2016.

FONTOURA, S. M. V. *et al.* Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 193, p. 27–41, 2019.

FUENTES-LLANILLO, R. *et al.* Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 208, [art.] 104877, 2021.

FURTINI NETO, A. E. *et al.* **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 32, p. 390–399, 2016.

HAO, T. *et al.* Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. **Journal of Environmental Management**, London, v. 270, [art.] 110888, Sept. 2020.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R.; MENDES, I. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade de produto brasileiro. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 80 p. (Documentos, 823).

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos**. Brasília, DF: INMET, 2021. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

JALALI, M.; ROWELL, D. L. Potassium leaching in undisturbed soil cores following surface applications of gypsum. **Environmental Geology**, Berlin, v. 57, n. 1, p. 41–48, 2009.

JAMAL, A.; MOON, Y. S.; ABDIN, M. Z. Enzyme activity assessment of peanut (*Arachis hypogea* L.) under slow-release sulphur fertilization. **Australian Journal of Crop Science**, Brisbane, v. 4, n. 3, p. 169–174, 2010.

JIAN, L. Y. *et al.* Cell wall polysaccharides are specifically involved in the exclusion of aluminum from the rice root apex. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 146, n. 2, p. 602–611, 2008.

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

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BARTZ, H. R. Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso de índice SMP em solos do RS e SC. *In*: REUNIÃO ANUAL DA ROLAS, 23., 2001, Frederico Westphalen. **Anais**. Frederico Westphalen: ROLAS/SBCS, 2001. p. 21-26.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. *In*: MELO, V. F. **Química e mineralogia do solo**: conceitos básicos e aplicação. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Estadual Paraná, 2019. p. 334-371.

KULAIF, Y. Distribuição regional da indústria de fertilizantes fosfatados no Brasil. *In*: KULAIF, Y. **A indústria de fertilizantes fosfatados no Brasil**: perfil

empresarial e distribuição regional. Rio de Janeiro: Ministério da Ciência e Tecnologia, Centro de Tecnologia Mineral, 1999. p 79-93.

KUZYAKOV, Y.; RAZAVI, B. S. Rhizosphere size and shape: temporal dynamics and spatial stationarity. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 135, p. 343–360, 2019.

MASCAGNI, H. J.; HARRISON, S. A.; PADGETT, G. B. Influence of sulfur fertility on wheat yield performance on alluvial and upland soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, p. 2133–2145, 2008.

MASCHIETTO, E. H. G. **Gesso agrícola na produção de milho em solo de alta fertilidade e baixa acidez em subsuperfície em plantio direto**. 2009. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2009.

MATTIELLO, L. *et al.* Transcriptional profile of maize roots under acid soil growth. **BMC Plant Biology**, Stuttgart, v. 10, [art.] 196, 2010.

MEURER, E. J.; BISSANI, C. A.; CARMONA, F. C. Solos ácidos e solos afetados por sais. *In*: MEURER, Egon José (ed.). **Fundamentos da química do solo**. 6. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2017. cap. 6, p. 155-175.

MIOTTO, A. *et al.* Soil acidity and aluminum speciation affected by liming in the conversion of a natural pasture from the Brazilian Campos Biome into no-tillage system for grain production. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Berlin v. 66, n. 2, p. 138–151, 2020.

OLIVEIRA, E. L. Rendimento de matéria seca e absorção de cálcio e magnésio pelo milho em função da relação Ca/Mg do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 17, p. 383–388, 1993.

PAULETTI, V. Equilíbrio entre bases do solo e produtividade das culturas. **Informações Agronômicas NPCT**, Piracicaba, n. 7, [p. 1-12], set. 2020.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Estadual Paraná, 2017.

PIAS, O. H. D. C. *et al.* Crop yield responses to sulfur fertilization in Brazilian no-till soils: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 43, p. 1–21, 2019.

PIAS, O. H. D. C. *et al.* Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, n. 2, p. 675–692, 2020.

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

RAMPIM, L. *et al.* Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1687–1698, 2011.

RANGEL, A. F.; RAO, I. M.; HORST, W. J. Intracellular distribution and binding state of aluminum in root apices of two common bean (*Phaseolus vulgaris*) genotypes in relation to Al toxicity. **Physiologia Plantarum**, Lund, v. 135, n. 2, p. 162–173, 2009.

RAZA, S. *et al.* Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands. **Global Change Biology**, Oxford, v. 26, n. 6, p. 3738–3751, 2020.

RHEINHEIMER, D. *et al.* Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 180, p. 222–231, 2018a.

RHEINHEIMER, D. S. *et al.* Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 313, p. 7–16, 2018b.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. 359 p.

SCHERER, H. W. Sulfur in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 172, p. 326–335, 2009.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 675–688, 2008.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação e Tecnologia, 2004.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. *In*: NOVAES, R. F. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 205–274.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2nd ed. San Diego: Elsevier Science, 2003.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2nd ed. New York: Oxford University, 2008.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

TIECHER, T. *et al.* Respostas de culturas à adubação sulfatada e deposição de enxofre atmosférico. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 60, n. 3, p. 420–427, 2013.

TIECHER, T. *et al.* Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 308, p. 78–85, 2017.

TIECHER, T. *et al.* Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 42, p. 1–17, 2018.

TIECHER, T. *et al.* Dynamics of sulfate and basic cations in soil solution as affected by gypsum fertilization in an Ultisol of Southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Berlin, v. 65, n. 14, p. 1998–2012, 2019.

VICENSI, M. *et al.* Do rates and splitting of phosphogypsum applications influence the soil and annual crops in a no-tillage system? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 40, p. 1–17, 2016.

VITTI, G. C. *et al.* Enxofre. *In*: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Estadual Paraná, 2018. p. 337–400.

WREGGE, M. S. *et al.* (ed.). **Atlas climático da região sul do Brasil**: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 110–117, 2007.

ZANDONÁ, R. R. *et al.* Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 128–137, 2015.

ZHUANG, J.; YU, G. R. Effects of surface coatings on electrochemical properties and contaminant sorption of clay minerals. **Chemosphere**, Oxford, v. 49, n. 6, p. 619–628, 2002.