

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

**MANEJO DA ACIDEZ DO SOLO E ADUBAÇÃO SULFATADA
NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

**Osmar Henrique de Castro Pias
(Tese de Doutorado)**

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

**MANEJO DA ACIDEZ DO SOLO E ADUBAÇÃO SULFATADA
NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

OSMAR HENRIQUE DE CASTRO PIAS
Engenheiro-Agrônomo (UFSM)

Tese apresentada
como um dos requisitos à obtenção
do Grau de Doutor em
Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Abril de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Pias, Osmar Henrique de Castro
MANEJO DA ACIDEZ DO SOLO E ADUBAÇÃO SULFATADA NO
SISTEMA PLANTIO DIRETO / Osmar Henrique de Castro
Pias. -- 2020.
144 f.
Orientador: Cimélio Bayer.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Gesso agrícola. 2. Meta-análise. 3. Enxofre. 4.
Calagem. I. Bayer, Cimélio, orient. II. Título.

OSMAR HENRIQUE DE CASTRO PIAS
Engenheiro Agrônomo (UFSM)
Mestre em Agronomia-Agricultura e Ambiente (UFSM)

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOCTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

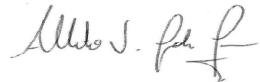
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 23/04/2020
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 18/06/2020
Por



CIMÉLIO BAYER
Orientador-PPG Ciência do Solo

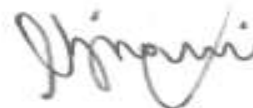


ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo

TALES TIECHER
PPG Ciência do Solo
UFRGS
(através de videoconferência/skype)

LUÍS CESAR CASSOL
UTFPR (Pato Branco)
(através de videoconferência/skype)

MAURÍCIO ROBERTO CHERUBIN
USP/ESALQ
(através de videoconferência/Skype)



CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

AGRADECIMENTOS

À Deus, inicialmente pela vida, saúde, sabedoria, pelas pessoas maravilhosas que colocou em meu caminho e as oportunidades concedidas, as quais tem possibilitado a realização dos meus sonhos.

À família, minha esposa Aline Belmonte por todo o incentivo e carinho e aos meus filhos Pedro Henrique e João Otávio os quais me fazem tentar ser uma pessoa melhor a cada dia, minhas maiores razões de viver.

Aos meus pais Osmar da Silva Pias (*in memoriam*) e Sirlei de Castro Pias, aos meus irmãos Adriana de Castro Pias e Celso Rodrigo de Castro, e ao meu padrasto João Carlos Vargas de Araújo por todo o amor, incentivo e ajuda sempre que foi necessário.

Ao meu orientador, Prof. Cimélio Bayer pela amizade, pelo conhecimento repassado a mim e pelo auxílio na condução do estudo, por aceitar o meu afastamento durante a condução do doutorado para realizar um sonho, tornar-me professor e, acima de tudo, por acreditar em meu potencial.

Aos amigos Prof. Tales Tiecher e Prof. Maurício Roberto Cherubin por toda a ajuda na realização dos estudos, pela amizade e pela incessante busca por novos conhecimentos, algo que me inspirei muito em vocês.

À equipe da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA) da Cooperativa Agrária, em especial à Sandra Mara Vieira Fontoura e Renato Paulo de Moraes pela idealização e condução dos protocolos a campo, cujos resultados obtidos foram essenciais para a realização desta tese.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela oportunidade de realizar um curso de Doutorado de qualidade e de forma gratuita, o qual proporcionou grande ganho intelectual a mim.

À todos os professores que tive durante essa longa jornada de mais de 22 anos de estudos, desde o pré-escolar até a conclusão do doutorado, com certeza o ensinamento de cada um culminou para que hoje eu pudesse estar concluindo esta importante etapa da minha vida.

À todos os amigos e colegas do PPGCS, pela ajuda sempre que necessária e pelos bons momentos de convivência.

A todos vocês, **muito obrigado!!!**

MANEJO DA ACIDEZ DO SOLO E ADUBAÇÃO SULFATADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO¹

Autor: Osmar Henrique de Castro Pias

Orientador: Prof. Cimélio Bayer

RESUMO

A acidez ao longo do perfil do solo e a deficiência de enxofre (S) são fatores que restringem a produtividade das culturas de grãos no Brasil. Dessa forma, objetivou-se, a partir da compilação de dados disponíveis na literatura e da condução de protocolos de campo, determinar as melhores estratégias de manejo da acidez do perfil do solo e da adubação com S para culturas de grãos em solos sob sistema plantio direto (SPD). No capítulo I, por meio de uma meta-análise de dados de 43 publicações científicas (930 pares de observação) determinou-se que o uso do gesso é viável (ganhos médios entre 7–14% na produtividade) em solos com saturação por Al no subsolo (0,20–0,40 m) superior a 5 e 10% para os cereais e soja, respectivamente. No capítulo II, avaliou-se o efeito de quatro doses de gesso (0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹) combinadas com três estratégias de calagem (calcário de baixo PRNT, e sem e com o parcelamento da dose de calcário de alto PRNT) além de um tratamento controle, na produtividade de 22 cultivos durante 12 anos. Os resultados demonstraram que em solos com baixa saturação por Al (< 5%) a aplicação de gesso é desnecessária. As estratégias de calagem não diferiram em relação à produtividade de grãos, mas o uso de calcário com baixo PRNT apresentou maior efeito residual no solo. No capítulo III, uma revisão sistemática da literatura (35 publicações científicas e 58 cultivos) demonstrou que a adubação com S aumentou em média, 16% a produtividade de grãos das culturas em 31% dos cultivos. Quando o teor de S-SO₄²⁻ disponível do solo estava abaixo do nível crítico (7,5 mg dm⁻³), a adubação com S incrementou a produtividade de grãos em 50% dos cultivos. Por outro lado, em solos com ausência de deficiência de S não houve aumento na produtividade das culturas. No capítulo IV, avaliou-se o efeito de aplicações anuais de 75 kg ha⁻¹ de S, utilizando como fontes o gesso e o S-elementar, na produtividade de 27 cultivos englobando três locais na região Centro-Sul do Paraná. Os resultados demonstraram que o uso do S-elementar mantém mais alto os teores S-SO₄²⁻ na superfície do solo em relação ao uso do gesso. Porém, não houve diferença na produtividade das culturas em relação as fontes de S utilizadas. Em apenas 4 de 27 (14,8%) cultivos avaliados houve aumento (9,9%) na produtividade de grãos pela adubação com S. A partir de revisões da literatura e de protocolos de campo essa tese estabeleceu níveis críticos de acidez para a recomendação de gesso como condicionador de solos, e de manejo da adubação sulfatada para cultura de grãos conduzidas em SPD no Brasil, buscando proporcionar aumento na produtividade das culturas e no retorno econômico aos produtores.

Palavras-chave: gesso agrícola, meta-análises, enxofre, calagem.

¹Tese de Doutorado 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. (144 p.) abril, 2020.

MANAGEMENT OF SOIL ACIDITY AND SULFUR FERTILIZATION IN NO-TILLAGE SYSTEM²

Author: Osmar Henrique de Castro Pias

Adviser: Prof. Cimélio Bayer

ABSTRACT

Soil acidity and sulfur deficiency are factors that restricts the crop grain yields in Brazil. This study aimed to determine the best strategies for managing soil acidity in the profile and sulfur fertilization for grain crops in no-tillage (NT) soils through the compilation of literature results and conduction of field trials. In chapter I, a meta-analysis of data from 43 scientific publications (930 pairs of observation) was performed and we determined that the use of gypsum is recommendable (average gains between 7–14% in yield) for soils with Al saturation in the subsoil (0,20–0,40 m) greater than 5 and 10% for cereals and soybean crops, respectively. In chapter II, four gypsum doses (0, 3, 6 and 9 Mg ha⁻¹) were combined with three liming strategies [low effective calcium carbonate equivalent (ECCE) lime and high-ECCE lime applied at once or split in three annual applications] plus a control treatment without lime or gypsum application, on crop yield in 22 crop seasons along of 12 years. The results showed that gypsum application is not recommendable for agricultural soils with Al saturation lower than 5%). The liming strategies did not differ in relation to grain yield, but the use of lime with lower ECCE had a greater residual effect on the soil acidity attributes. In chapter III, a systematic review of the literature (35 scientific publications and 58 crop seasons) showed that S fertilization increased crop grain yield by 16% in average of 31% of the crop seasons. When the soil available S-SO₄²⁻ content was below the critical level (7.5 mg dm⁻³) S fertilization increased grain yield in 50% of the cases. On the other hand, in soils with no S deficiency there was no increase in crop grain yields. In chapter IV, was evaluated the effect of annual applications of 75 kg ha⁻¹ of S using gypsum and elemental S as S-source in 27 crop seasons in three locations in the Center-South of Paraná. The results showed that the use of elemental S keeps the available S-SO₄²⁻ content on the soil surface higher than the use of gypsum. However, there was neither effect of S fertilization on crop grain yields nor of the S source. In only 4 out of 27 (14.8%) crop seasons there were increase of grain yield (9.9%) by S fertilization. Based on literature data analysis and field trials conducted, this thesis established critical levels of acidity for gypsum recommendation as a soil conditioner, and management of sulfur fertilization for grain crops under NT in Brazil, seeking to increase yield and profitability of crops.

Keywords: gypsum, meta-analysis, sulfur, liming.

²Doctoral thesis in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (144 p.) April, 2020.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO I - A APLICAÇÃO DE GESSO AGRÍCOLA AUMENTA A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE GRÃOS EM SOLOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO? UMA META-ANÁLISE.....	5
1. Introdução.....	5
2. Material e métodos.....	8
2.1 Coleta dos dados.....	8
2.2 Análise de árvore de regressão.....	10
2.3 Meta-análise dos dados.....	11
3. Resultados.....	12
3.1 Caracterização dos estudos com aplicação de gesso agrícola em solos sob sistema plantio direto.....	12
3.2 Resposta da produtividade de grãos das culturas à aplicação de gesso agrícola.....	15
3.3 Árvore de regressão do efeito da aplicação de gesso agrícola na produtividade de grãos das culturas.....	18
3.4 Efeito do gesso agrícola na produtividade de grãos das culturas em solos com diferentes níveis de saturação por Al^{3+} e teores de Ca^{2+} trocável.....	19
3.5 Produtividade de grãos e efeito residual de diferentes doses de gesso agrícola.....	21
3.6 Probabilidade de resposta positiva das culturas à aplicação de gesso agrícola.....	23
4 Discussão.....	25
4.1 Respostas de culturas anuais à aplicação de gesso agrícola.....	25
4.2 Incremento na produtividade das culturas pela aplicação de gesso agrícola em solos com diferentes níveis de saturação por Al e de Ca^{2+} trocável.....	27
4.3 Dose aplicada e efeito residual do gesso.....	30
4.4 Limitações do uso do gesso em solos com alta acidez.....	32
4.5 Perspectivas futuras para estudos com gesso agrícola em solos ácidos.....	36
5. Conclusões.....	37
CAPÍTULO II - DOSES DE GESSO E CALCÁRIOS COM DIFERENTES REATIVIDADES NA ACIDEZ DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DAS CULTURAS EM UM LATOSSOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	39
1. Introdução.....	39
2. Material e métodos.....	43
2.1 Descrição da região e da área experimental.....	43
2.2 Condução e avaliação dos cultivos.....	45
2.3 Amostragem de solo.....	47
2.4 Análise estatística.....	48
3. Resultados.....	48
3.1 Componentes da acidez do solo em função da calagem.....	48

3.2 Componentes da acidez do solo em função da aplicação de gesso agrícola.....	52
3.3 Teores de macronutrientes no tecido vegetal em função da aplicação de calcário e gesso agrícola.....	55
3.4 Produtividade de grãos das culturas em função da aplicação de calcário e gesso agrícola.....	57
4 Discussão.....	62
4.1 Calagem e a correção da acidez do solo.....	62
4.2 Gessagem e os componentes da acidez do solo.....	64
4.3 Atributos químicos do solo, teores de nutrientes no tecido vegetal e produtividade das culturas em função de diferentes estratégias de calagem.....	66
4.4. Atributos químicos do solo, teores de nutrientes no tecido vegetal e produtividade das culturas em função de diferentes doses de gesso agrícola.....	70
5. Conclusões.....	73
CAPÍTULO III – RESPOSTA DAS CULTURAS DE GRÃOS À ADUBAÇÃO SULFATADA EM SOLOS BRASILEIROS CONDUZIDOS EM SISTEMA PLANTIO DIRETO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	74
1. Introdução.....	74
2. Material e métodos.....	78
2.1 Compilação dos dados.....	78
2.2 Análise dos dados.....	80
3 Resultados e discussão.....	83
3.1 Caracterização dos estudos de adubação com S.....	83
3.2 Resposta positiva das culturas de grãos à adubação com S.....	84
3.3 Influência da dose de S aplicada na produtividade das culturas.....	89
3.4 Influência da fonte de S na resposta das culturas.....	90
3.5 Produtividade de grãos das culturas em função do teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo.....	92
3.6 Teor de S no tecido foliar das culturas e a produtividade de grãos.....	94
3.7 Árvore de regressão da resposta das culturas à adubação com S em solos sob sistema plantio direto no Brasil.....	95
3.8 Sugestões para pesquisas futuras com adubação com S em culturas de grãos no Brasil sob sistema plantio direto.....	97
4 Conclusões.....	98
CAPÍTULO IV – DEPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA DE ENXOFRE, PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E TEORES DE SULFATO EM SOLO SUBMETIDO A APLICAÇÕES ANUAIS DE GESSO E S-ELEMENTAR	100
1. Introdução.....	100
2. Material e métodos.....	102
2.1 Descrição dos locais de estudo e tratamentos.....	102
2.2 Condução dos cultivos e variáveis analisadas.....	103
2.3 Análise estatística.....	105
3 Resultados e discussão.....	106
3.1 Deposição atmosférica de S nos locais dos experimentos.....	106
3.2 Teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo ao longo de 5 anos de aplicações anuais de S em Candói.....	107

3.3 Teores de S-SO ₄ ²⁻ disponível no solo ao longo de 4 anos de aplicações anuais de S em Reserva do Iguaçu.....	110
3.4 Teores de S-SO ₄ ²⁻ disponível no solo ao longo de 7 anos de aplicações anuais de S em Goioxim.....	111
3.5 Produtividade de grãos em função da aplicação de S via gesso e S-Elementar.....	114
3.6 Relação entre a produtividade das culturas e os teores de S-SO ₄ ²⁻ disponível no solo.....	118
4 Conclusões.....	119
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	121
REFERÊNCIAS.....	125
APÊNDICE.....	137
RESUMO BIBLIOGRÁFICO.....	144

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Resumo das características dos estudos primários que avaliaram a resposta das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola em solo sob sistema plantio direto e que foram utilizados na presente meta-análise.....	9
Tabela 2. Propriedades químicas do solo no início do experimento em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	45
Tabela 3. Informações agronômicas de todos os cultivos conduzidos na área experimental durante os anos de 2004 a 2017 em Guarapuava, PR.....	46
Tabela 4. Concentração de nutrientes (g kg^{-1}) foliar (média \pm desvio padrão) da aveia branca e soja em função da calagem superficial com calcário de baixo e alto poder relativo de neutralização total (PRNT) aplicados em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	56
Tabela 5. Rendimento de grãos (média \pm desvio padrão, Mg ha^{-1}) em função da aplicação superficial de calcário com baixo e alto poder relativo de neutralização total (PRNT) aplicado em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	58
Tabela 6. Resumo das principais informações dos estudos incluídos nesta revisão sistemática.....	81
Tabela 7. Atributos químicos dos solos antes da instalação dos experimentos.....	103
Tabela 8. Informações agronômicas dos cultivos realizados avaliando o efeito da adubação sulfatada em Goioxim, Reserva do Iguaçu e Candói durante os anos de 2012/2013 a 2018/2019, no Centro-Sul do Paraná...	104
Tabela 9. Produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) das culturas em função da aplicação de 75 kg ha^{-1} de enxofre a partir de gesso e S-Elementar em três locais em solos sob sistema plantio direto no Centro-Sul do Paraná.....	115

RELAÇÃO DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização detalhada dos locais (cidade e estado) de cultivo dos estudos primários na América do Sul (a, b) e principais características do conjunto de dados: percentagem de cultivos (ambiente x ano) realizados em cada estado do Brasil e no Paraguai (c), tipo de solo (d), cultura avaliada (e) ocorrência de déficit hídrico durante os cultivos (f) em estudos testando a resposta das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola em solos sob sistema plantio direto..... 13
- Figura 2.** Medidas de posição das propriedades do solo (0,20-0,40 m): teores de Ca^{2+} trocável (a), Al^{3+} trocável (b), argila (c) e saturação por Al (d) e das doses de gesso avaliadas (d) e anos entre aplicação do gesso e avaliação dos cultivos (e) do banco de dados que incluiu todos os estudos primários que avaliaram o efeito do gesso agrícola na produtividade das culturas de grãos em sistema plantio direto..... 14
- Figura 3.** Efeito da aplicação de gesso agrícola no rendimento de grãos das culturas de cada estudo primário em solos sob sistema plantio direto..... 16
- Figura 4.** Efeito da aplicação de gesso agrícola no rendimento de grãos de diferentes culturas (a) em diferentes zonas climáticas (b) e com a ocorrência ou não de deficiência hídrica durante o ciclo (b) em solos sob sistema plantio direto..... 17
- Figura 5.** Taxa de resposta em rendimento de grãos do milho (a), trigo (b), cevada (c), arroz (d), aveia (e) e soja (f) à aplicação de gesso agrícola em relação ao rendimento de grãos no tratamento controle..... 17
- Figura 6.** Árvore de regressão do efeito da aplicação de gesso no rendimento de grãos (%) das culturas em solos sob sistema plantio direto..... 18
- Figura 7.** Efeito na produtividade de grãos dos cereais e da soja pela aplicação do gesso agrícola em subsolos (0,20–0,40 m) com diferentes saturações por Al (a, b) e teores de Ca^{2+} trocável (c, d) sem e com a ocorrência de déficit hídrico..... 20
- Figura 8.** Relação entre os teores de Ca^{2+} (a) e Al^{3+} (b) trocáveis com a saturação por Al na camada de 0,20–0,40 m do solo antes da aplicação dos tratamentos nos estudos primários que avaliaram a resposta das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola em solos sob sistema plantio direto..... 21
- Figura 9.** Efeito no rendimento de grãos dos cereais (a, b) e da soja (c, d) sem e com a ocorrência de déficit hídrico pela aplicação de diferentes doses de gesso agrícola em período inferior e superior a dois anos entre a aplicação dos tratamentos e a semeadura das culturas em

solos com saturação por Al em subsuperfície (0,20–0,40 m) acima dos níveis críticos.....	22
Figura 10. Probabilidade de exceder a um determinado efeito no rendimento de grãos dos cereais (a, b) e da soja (c, d) pela aplicação de gesso agrícola em solos com diferentes níveis de saturação por Al sob sistema plantio direto sem e com ocorrência de déficit hídrico.....	24
Figura 11. Sugestões de manejo da camada subsuperficial de solos sob sistema plantio direto de acordo com os níveis de saturação por Al..	35
Figura 12. Precipitação mensal durante a condução do experimento (2004-2017), precipitação média histórica (1976-2016) e precipitação acumulada em cada cultivo em Guarapuava, PR.....	44
Figura 13. Valores de $\text{pH}_{\text{água}}$ (a, b) e teores de Al^{3+} trocável (c, d) em curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a calagem utilizando calcário de baixo (76%) e alto (101%) poder relativo de neutralização total (PRNT) aplicado em uma única vez ou parcelado (parc) em três aplicações anuais em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	49
Figura 14. Teores de Ca^{2+} (a, b) e Mg^{2+} trocáveis (c, d) e de saturação por bases (e, f) em curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a calagem utilizando calcário com baixo (76%) e alto (101%) PRNT aplicado em uma única vez ou parcelado (parc) em três aplicações anuais em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR	51
Figura 15. Valores de $\text{pH}_{\text{água}}$ (a, b) e teores de Al^{3+} trocável (c, d) em curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a aplicação de doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	52
Figura 16. Teores de Ca^{2+} (a, b) e Mg^{2+} (c, d) trocáveis e relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$ trocáveis (e, f) em curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a aplicação de doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	54
Figura 17. Teores de S-SO_4^{2-} disponível no solo em longo prazo (11 anos) após a aplicação de doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	55
Figura 18. Teores médios de P (a), Ca (b), Mg (c) e S (d) foliar das culturas soja, milho, aveia branca e trigo em função da aplicação de doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	57
Figura 19. Produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) da aveia (a), trigo (b), milho (c), cevada (d) e soja (e, f) em função da aplicação de doses de gesso agrícola no ano de 2004 em um Latossolo sob sistema plantio	

direto em Guarapuava, PR.....	59
Figura 20. Produtividade relativa acumulada de grãos da cultura da soja (10 cultivos), cereais (12 cultivos) e do total de cultivos (22 cultivos) em função da realização de calagem com corretivos de alto e baixo poder relativo de neutralização total (PRNT) (a) e da aplicação de doses de gesso agrícola (b) em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	60
Figura 21. Correlação entre os teores de N foliar da cultura da soja (2006/07, 2007/08 e 2008/09) (a), P foliar da cultura da soja (2006/07 e 2007/08) (b), P (c) e Mg (d) foliar da aveia branca (2004) com a produtividade relativa de grãos dos respectivos cultivos em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	61
Figura 22. Distribuição geográfica dos cultivos por cidade (a) e frequência relativa de cultivos agrupados por estado (b), por espécie de cultura (c), pela média produtiva (d) e pelo tipo de solo (e) em estudos que avaliaram o efeito da adubação com S em solos sob sistema plantio direto no Brasil.....	79
Figura 23. Estatística descritiva dos parâmetros de solo (0,00–0,20 m): matéria orgânica (a), argila (b), S-SO ₄ ²⁻ disponível (c) e pH _{água} (d) dos estudos que avaliaram o efeito da adubação com S na produtividade de culturas de grãos em sistema plantio direto no Brasil.....	84
Figura 24. Frequência relativa da resposta positiva das culturas à adubação com S em solos conduzidos em plantio direto com diferentes níveis de S-SO ₄ ²⁻ disponível (a) matéria orgânica (b), argila (c) e pH _(água) (d) em função da zona climática (e) e da produtividade média das culturas (f).....	85
Figura 25. Frequência relativa da resposta das culturas de grãos à adubação com enxofre em solos sob sistema plantio direto no Brasil (a) e média de incremento no rendimento de grãos (%) dos cultivos com resposta positiva.....	88
Figura 26. Rendimento relativo de grãos de diferentes culturas em cultivos com (a) e sem (b) resposta positiva à aplicação de diferentes doses de enxofre em solos sob sistema plantio direto no Brasil.....	90
Figura 27. Produtividade relativa de grãos das culturas em função do teor de S-SO ₄ ²⁻ disponível no solo na camada superficial (0,00–0,20 m) (a) e subsuperficial (0,20–0,40 m) (b) em solos sob sistema plantio direto no Brasil.....	93
Figura 28. Relação entre o teor de S no tecido foliar e o rendimento relativo de grãos das culturas do trigo e milho (a), e da soja, canola e feijão (b).....	95

Figura 29. Árvore de regressão da proporção de cultivos de culturas de grãos com reposta positiva à adubação com S em solos sob sistema plantio direto no Brasil.....	96
Figura 30. Deposição atmosférica de enxofre e precipitação pluvial entre o período de outubro de 2017 a outubro de 2018, nos três locais de estudo.....	107
Figura 31. Teores de S-SO ₄ ²⁻ disponível no solo nas camadas de 0,00–0,10 (a), 0,10–0,20 (b), 0,20–0,40 (c) e 0,40–0,60 m (d) durante cinco anos de aplicações anuais de 75 kg ha ⁻¹ de S utilizando como fonte gesso e S-elementar em Candói, PR.....	108
Figura 32. Teores de S-SO ₄ ²⁻ disponível no solo nas camadas de 0,00–0,10 (a), 0,10–0,20 (b), 0,20–0,40 (c) e 0,40–0,60 m (d) durante quatro anos de aplicações anuais de 75 kg ha ⁻¹ de S utilizando como fonte gesso e S-elementar em Reserva do Iguaçu, PR.....	111
Figura 33. Teores de S-SO ₄ ²⁻ disponível no solo nas camadas de 0,00–0,10 (a), 0,10–0,20 (b), 0,20–0,40 (c) e 0,40–0,60 m (d) durante sete anos de aplicações anuais de 75 kg ha ⁻¹ de S utilizando como fonte gesso e S-elementar em Goioxim, PR.....	112
Figura 34. Média do rendimento relativo (%) das culturas nos diferentes cultivos em função da aplicação de 75 kg ha ⁻¹ de enxofre utilizando-se como fonte gesso e S-elementar em Goioxim (a), Reserva do Iguaçu (b), Candói (c) e todos os cultivos (d).....	117
Figura 35. Rendimento relativo das culturas nos três locais de cultivo em função do teor de S-SO ₄ ²⁻ disponível (mg dm ⁻³) nas camadas de 0,00–0,10 (a), 0,10–0,20 (b), 0,20–0,40 (c) e 0,40–0,60 m (d) do solo.....	118

RELAÇÃO DE APÊNDICES

Apêndice 1. Parâmetros químicos e físicos do calcário com alto e baixo poder relativo de neutralização total (PRNT) e do gesso agrícola utilizado no experimento em Guarapuava, PR.....	137
Apêndice 2. Análise de variância do efeito de diferentes estratégias de calagem superficial e de doses de gesso agrícola a curto (1 anos) e longo prazo (11 anos) nas propriedades químicas de um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	137
Apêndice 3. Análise de variância do efeito de diferentes estratégias de calagem superficial e de doses de gesso agrícola na produtividade de grãos de diferentes culturas conduzidas em sistema plantio direto em um Latossolo em Guarapuava, PR.....	138
Apêndice 4. Análise de variância do efeito de diferentes estratégias de calagem superficial e de doses de gesso agrícola na concentração de nutrientes foliares de diferentes culturas conduzidas em sistema plantio direto em um Latossolo em Guarapuava, PR.....	139
Apêndice 5. Teor de nutriente (g kg^{-1}) no tecido foliar das culturas (média \pm desvio padrão) em função da aplicação superficial de calcário com baixo e alto poder relativo de neutralização total (PRNT) em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	140
Apêndice 6. Teor de nutrientes (g kg^{-1}) no tecido foliar das culturas (média \pm desvio padrão) em função da aplicação de diferentes doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	141
Apêndice 7. Correlação linear de Pearson entre o teor de nutrientes foliares e o rendimento relativo de grãos de seu respectivo cultivo sob sistema plantio direto em um Latossolo em Guarapuava, PR.....	142
Apêndice 8. Teores de P disponível (a, b) e valores de saturação por bases (c, d) a curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a aplicação de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema Plantio direto em Guarapuava, PR.....	142
Apêndice 9. Teor de P disponível no solo a curto (1 ano) (a) e longo prazo (11 anos) (b) após aplicação superficial de calcário de baixo e alto poder relativo de neutralização total (PRNT) em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.....	143

INTRODUÇÃO GERAL

Devido à crescente demanda mundial por alimentos, a busca pelo aumento da produtividade das culturas é essencial. Aliado a isso, a cadeia produtiva das culturas deve estar alicerçada nos princípios da sustentabilidade (econômica, social e ambiental). O manejo conservacionista do solo, representado no Brasil principalmente pelo sistema plantio direto (SPD), tornou-se a base de produção de grãos no país a partir da década de 1990. A área em SPD no Brasil em 2018 era de aproximadamente 32,8 milhões de ha (FEBRAPDP, 2018). O SPD tem demonstrado ser altamente eficiente em solos de clima tropical e subtropical, reduzindo substancialmente os problemas com erosão dos solos, promovendo o aumento dos teores de matéria orgânica, e com isso, melhorando a fertilidade do solo de maneira geral, com reflexos positivos na produtividade e rentabilidade das culturas, além de benefícios para o meio ambiente.

Devido à adoção ao SPD no Brasil ser relativamente recente, algumas práticas de manejo ainda precisam ser mais bem compreendidas, em especial no que se refere à adubação e calagem do solo. Nessa subárea, grande parte das atuais recomendações foram estabelecidas a partir da adaptação de recomendações geradas para solos em sistema de preparo convencional. Contudo, a adoção ao SPD resulta em profundas modificações na dinâmica da acidez e dos nutrientes no solo em relação a solos em sistema de preparo convencional. Essa constatação é bem ilustrada pela modificação do conceito de camada arável que impera em solos em sistema de preparo convencional para um conceito de gradiente de concentração de nutrientes e de matéria orgânica ao longo do perfil de solos em SPD (alta variação dos teores de nutrientes ao longo do perfil do solo).

Em regiões com intensa precipitação pluvial e altas temperaturas a acidez do solo é um dos principais fatores limitantes à produtividade das culturas. A acidez afeta a disponibilidade de todos os nutrientes essenciais e elementos tóxicos para as plantas, além das propriedades físicas e biológicas do solo. Em solos agrícolas em SPD, a acidez é comumente corrigida pela aplicação superficial de calcário. O calcário apresenta diferentes níveis de eficiência a curto prazo (três meses), o que denominamos como poder relativo de neutralização total (PRNT) do corretivo. Calcários com maior PRNT exigem doses menores do corretivo para a correção da acidez o que é interessante devido à redução dos custos de transporte e aplicação. Por outro lado, esse tipo de calcário pode apresentar um menor efeito residual em relação a calcário de baixo PRNT. A eficiência do parcelamento da dose de calcário para aumentar a sua eficiência também permanece em discussão no meio científico, visando evitar a alcalinização da superfície do solo e redução das perdas de calcário por erosão.

Devido à aplicação ser superficial, uma característica intrínseca do calcário que afeta a sua eficiência em SPD, é a baixa solubilidade, o que dificulta a sua descida no perfil do solo, sendo, portanto, seus efeitos visualizados principalmente na camada superficial do solo (0,00–0,10 m). No Brasil, devido à ausência de conhecimento e/ou de suporte financeiro a transição do sistema de preparo convencional para o SPD em boa parte das propriedades ocorreu sem atender alguns requisitos técnicos, como a realização da correção em profundidade (0,00–0,20 m) da acidez e dos teores de fósforo do solo. Dessa forma, é comum detectarmos solos com baixa acidez em superfície aliado a alta acidez em camadas subsuperficiais. A alta acidez se caracteriza por altos teores de Al^{3+} trocável e baixos teores de cátions básicos, reduzindo/limitando o desenvolvimento radicular das culturas e, por consequência, a absorção de água e de nutrientes impactando negativamente na produtividade de grãos.

Para solos com alta acidez em subsuperfície, o gesso agrícola tem sido preconizado como um condicionador de solo capaz de mitigar os efeitos indesejados da acidez. O gesso agrícola é uma fonte rica em cálcio (Ca) e enxofre (S), além de apresentar maior solubilidade que o calcário. Dessa forma, rapidamente o gesso transloca no perfil do solo (como par iônico neutro)

resultando em uma sensível redução da atividade do Al^{3+} trocável devido ao aumento da concentração dos cátions básicos em subsuperfície (Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis). Com a redução da toxidez causada pelo Al^{3+} trocável nas plantas e o aumento da disponibilidade de Ca^{2+} trocável, a planta consegue expandir o seu sistema radicular para camadas mais profundas aumentando o volume de solo explorado e, conseqüentemente, a capacidade de absorção de água e nutrientes.

Apesar dos efeitos comprovados do gesso agrícola como condicionador de solos ácidos, os resultados em SPD ainda são bastante variáveis, permanecendo muitas dúvidas a serem respondidas, dentre elas: É vantajoso tecnicamente a aplicação conjunta de calcário e gesso? Quais os níveis críticos de acidez em que se deve recomendar o uso do gesso? Qual a forma de se determinar a dose de gesso agrícola? A melhoria nos atributos químicos do solo pelo uso do gesso apresenta efeito residual de quanto tempo? Qual a média de incremento em produtividade das culturas de grãos pelo uso do gesso? Devido a essa série de questionamentos atualmente ainda não se tem recomendação oficial de gesso para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS RS/SC, 2016), enquanto para o Paraná apenas se incorporou as recomendações do Cerrado, desenvolvidas para solos em sistema de preparo convencional (Pauletti & Motta, 2017).

Outro assunto com ascensão no meio científico de manejo de solos em SPD é a adubação com enxofre (S). Dentre todos os macronutrientes o S é o menos estudado, pois, de maneira geral, pouco impacto na produtividade das culturas foi identificado historicamente. Entretanto, tem se observado o aumento da probabilidade de resposta positiva das culturas à aplicação de S, o que pode ser devido a uma série de fatores, como a redução da deposição atmosférica de S, aumento do uso de fertilizantes (NPK) concentrados sem a presença de S e do aumento do potencial produtivo das culturas, entre outros. O S em solos em SPD apresenta uma tendência de ser mais lixiviado do que em sistema de preparo convencional, por outro lado, normalmente se tem uma maior fonte de S (matéria orgânica) em solos sob SPD. Dessa forma, são necessários estudos adicionais para caracterizar níveis críticos de S-SO_4^{2-} disponível no solo e para definir estratégias de manejo de fertilizante com S em solos sob SPD. Além disso, o uso de fontes de S não prontamente disponível

como o S-elementar tem sido recomendado por vários consultores, mesmo ainda com baixo respaldo técnico.

Dessa forma, visando abranger essas duas lacunas de conhecimento (acidez e adubação com S) na área da ciência do solo, o presente estudo foi realizado buscando adequar um correto manejo da acidez ao longo do perfil do solo com uso de gesso e calcário e da adubação sulfatada para o Brasil. Os protocolos de campo foram conduzidos no Centro-Sul do Paraná, na região de atuação da Cooperativa Agrária. Os mais de 110 mil ha cultivados na região de abrangência da Cooperativa Agrária apresentam em sua maioria, alto nível tecnológico e de investimentos o que tem resultado na obtenção de médias de rendimento de grãos bastante superiores às observadas no restante do Brasil. Por esse motivo, nesta região o uso do gesso agrícola e da adubação sulfatada tem sido preconizado como alternativa, na busca por incremento na produtividade das culturas, embora as recomendações atuais para o estado (Pauletti & Motta, 2017) não deem suporte à aplicação desses insumos na maioria dos solos da região.

Os objetivos dessa tese foram: a) sintetizar e avaliar de maneira conjunta todos os resultados de resposta das culturas de grãos à adubação com S e à aplicação de gesso agrícola em solos em SPD no Brasil; b) avaliar a resposta das culturas de grãos ao gesso agrícola, estratégias de calagem e à adubação com S oriundo de diferentes fontes em experimentos de longa duração na região Centro-Sul do PR, e c) definir critérios para tomada de decisão em relação à recomendação de manejo da acidez ao longo do perfil do solo e da adubação com S para culturas de grãos em SPD no Brasil.

CAPÍTULO I - A APLICAÇÃO DE GESSO AGRÍCOLA AUMENTA A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE GRÃOS EM SOLOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO? UMA META-ANÁLISE³

1. Introdução

Solos naturalmente ácidos ($\text{pH}_{\text{água}} < 5,5$) representam mundialmente mais de 75% da área potencialmente cultivável (Von Uexküll & Mutert, 1995). A acidez e a baixa disponibilidade de nutrientes são os principais fatores que restringem a produtividade das culturas em solos tropicais e subtropicais, devido ao avançado processo de intemperização (Costa & Crusciol, 2016; Joris et al., 2016; Tiritan et al., 2016). A calagem é a prática mais difundida para correção da acidez do solo, promovendo a redução da toxidez por Al^{3+} trocável e Mn^{2+} , e aumento do pH, da concentração de cátions básicos e da capacidade de troca de cátions (CTC), o que é fundamental em solos com predominância de carga variável (Zandoná et al., 2015; Joris et al., 2016; Tiritan et al., 2016).

Contudo, devido à baixa solubilidade do calcário, a calagem nem sempre é eficiente na correção da acidez em subsuperfície (considerada nesse estudo a camada de 0,20–0,40 m), principalmente em solos de baixa qualidade estrutural (e.g., baixos teores de matéria orgânica, compactados e degradados) (Bortoluzzi et al., 2014; Joris et al., 2016; Rheinheimer et al., 2018a). Em função disso, áreas sob SPD, principalmente quando iniciada no sistema de maneira inadequada (ausência de correção do solo em profundidade), comumente apresentam alta concentração de Al^{3+} trocável e baixa

³ Artigo publicado na revista **Agronomy Journal**, v. 112, n. 1, p. 1-18, 2020. doi: 10.1002/agj2.20125.

concentração de cátions básicos em subsuperfície (Bortoluzzi et al., 2014). A alta acidez subsuperficial reduz o desenvolvimento radicular das plantas e, conseqüentemente, compromete a absorção de nutrientes, aproveitamento da água disponível e, por fim, a produtividade das culturas (Dalla Nora & Amado, 2013; Michalovicz et al. 2014; Caires et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017a).

A preocupação com a acidez subsuperficial é mais relevante em solos conduzidos em SPD que globalmente estende-se por aproximadamente 180 Mha, dos quais mais de 32,8 Mha localizam-se no Brasil (FEBRAPDP, 2018; Kassan et al., 2019). Em solos conduzidos em SPD contínuo, baseados nos princípios do mínimo revolvimento e do alto aporte de resíduos (Pittelkow et al., 2015), há a indução da formação de um gradiente de concentração de nutrientes e matéria orgânica, devido, às sucessivas aplicações de fertilizantes e corretivos e da deposição de biomassa na superfície (Dalla Nora & Amado, 2013; Tiecher et al., 2018), diferentemente da “homogeneização” das propriedades químicas ao longo do perfil proporcionado pelo periódico revolvimento do solo e incorporação dos resíduos no sistema de preparo convencional (Bortoluzzi et al., 2014; Rheinheimer et al., 2018b).

O gesso agrícola (*i.e.*, 20% de Ca, 15–18% de S, 0,5–0,8% de P) é um subproduto da indústria produtora de fertilizantes fosfatados de ampla disponibilidade mundial (Caires et al., 2011b) e tem sido recomendado e utilizado como condicionador de solos que apresentam de mediana a elevada acidez em subsuperfície (Soratto & Crusciol, 2008b; Zandoná et al., 2015; Costa & Crusciol, 2016; Dalla Nora et al., 2017a). Globalmente, o gesso agrícola é utilizado na agricultura como fonte de Ca e S, condicionador de atributos físicos e mitigador da salinidade dos solos (Zoca & Penn, 2017). O potencial de uso do gesso agrícola visando mitigar os efeitos adversos da acidez subsuperficial foi descoberta no Brasil no final da década de 1970 em sistema de preparo convencional (Ritchey et al., 1980) e ainda vem sendo utilizado para esse fim quase que unicamente nesse país. Apesar de o gesso agrícola não influenciar significativamente o pH do solo, devido aos seus produtos de solubilidade não gerarem OH^- e nem consumirem H^+ (Zocca & Penn, 2017), o gesso agrícola apresenta solubilidade ($2,5 \text{ g L}^{-1}$) aproximadamente 150 vezes superior ao calcário (Crusciol et al., 2016; Marchesan et al., 2017). Essa maior solubilidade do gesso agrícola possibilita

uma alta mobilidade de cátions básicos (*i.e.*, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis) associados, principalmente, ao sulfato (SO_4^{2-}) da superfície do solo para camadas mais profundas e, dessa forma, causa redução da atividade e toxicidade do Al^{3+} trocável às plantas ao se dissociar em subsuperfície, possibilitando o aprofundamento do sistema radicular das plantas e, conseqüentemente, melhorando o aproveitamento de água e nutrientes (Pauletti et al., 2014; Crusciol et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017b; Zoca & Penn, 2017).

As respostas das culturas à aplicação de gesso agrícola reportadas na literatura têm sido amplamente variáveis ocorrendo desde substanciais incrementos (Soratto & Crusciol, 2008b; Dalla Nora & Amado, 2013; Caires et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017a; Costa & Crusciol, 2016), ausência de efeito (Dalla Nora et al., 2017a; Marchesan et al., 2017; Fontoura et al., 2019), até pequenas reduções em produtividade de grãos (Pauletti et al., 2014; Somavilla et al., 2016). Estes resultados contrastantes podem estar relacionados a uma série de fatores, como a textura, acidez e tipo de solo, disponibilidade hídrica, espécie da cultura, dose de gesso agrícola aplicada, tempo entre aplicação do gesso agrícola e o cultivo das culturas, etc, fatores esses que devem atuar de forma associada. Dessa forma, é imprescindível a avaliação conjunta dos estudos disponíveis na literatura nessa temática visando responder três questões-chave para o adequado posicionamento técnico sobre o uso do gesso agrícola: (i) Qual é o nível crítico de acidez subsuperficial do solo para se recomendar gesso agrícola? (ii) Quais são os principais fatores que determinam a resposta em produtividade de grãos das culturas à aplicação de gesso agrícola? (iii) Qual é o incremento médio de produtividade de grãos e a probabilidade de haver resposta positiva pela aplicação de gesso agrícola? Tais informações são fundamentais para auxiliar produtores e consultores agrícolas na tomada de decisão frente ao manejo do uso do gesso agrícola em solos ácidos visando uma maior rentabilidade e sustentabilidade do sistema produtivo (Soratto & Crusciol, 2008b; Dalla Nora et al., 2017a). Além disso, melhorias no manejo do gesso agrícola baseadas principalmente em experimentos conduzidos no Brasil, podem contribuir para a expansão do uso do gesso agrícola em outras regiões tropicais e subtropicais do mundo (*e.g.*, países latino-americanos e africanos) que apresentam solos naturalmente

ácidos e com baixa fertilidade (Kihara et al., 2017) mesmo que experimentos regionalizados possam ser necessários. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi, por meio de uma meta-análise dos resultados disponíveis na literatura, avaliar a resposta das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola em solos sob SPD.

2. Material e métodos

2.1 Coleta dos dados

Realizou-se uma revisão sistemática da literatura de estudos que avaliaram a resposta das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola em solos sob SPD. Os artigos científicos foram buscados nas bases de dados Scielo, Scopus, Web of Science e Google Scholar durante o período de setembro de 2017 a fevereiro de 2018. Os seguintes termos, em inglês e português, utilizados em conjunto ou individualmente foram utilizados na busca: “no-till/no-tillage”, “gypsum”, “phosphogypsum” e “crop yields”. Além da busca nas bases de dados, foram revisadas as referências bibliográficas de todos os estudos encontrados na busca inicial. Na sequência, foram excluídos do banco de dados estudos que tiveram consonância com algum dos seguintes critérios: (i) estudos realizados em casa de vegetação ou em que o solo era submetido ao preparo convencional com lavração e gradagens, (ii) ausência de tratamento controle (sem aplicação do gesso agrícola), (iii) número de repetições do estudo inferior a três e/ou ausência de casualização, (iv) ausência de caracterização inicial da acidez do solo em subsuperfície e (v) estudos com culturas que totalizaram número de cultivos inferior a cinco. Após a aplicação dos critérios de exclusão, o banco de dados final foi constituído por 43 publicações científicas (*viz.*, 35 artigos científicos, quatro dissertações de mestrado e quatro teses de doutorado) referentes ao período de 1996 a 2019, perfazendo 129 cultivos (*i.e.*, ambiente x ano) de seis culturas que totalizaram 930 pares de observação (*i.e.*, tratamento x controle) (Tabela 1).

As informações extraídas em cada estudo primário foram as seguintes: (i) tipo da cultura (ii) média de produtividade de grãos dos tratamentos que receberam a aplicação do gesso agrícola e do tratamento

Tabela 1. Resumo das características dos estudos primários que avaliaram a resposta das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola em solos sob sistema plantio direto e que foram utilizados na presente meta-análise.

Referências	Fonte	Culturas	Cidade/estado/Pais	Cultivo	Pares de observações	Dose de gesso (Mg ha ⁻¹)
Arf et al. (2014)	Rev Bras Eng Agr Amb	Arroz	Selvíria, MS, BRA ¹	3	9	0, 1, 2 e 3
Caires et al. (1998)	Rev Bras Cienc Solo	Soja	Ponta Grossa, PR, BRA	2	24	0, 4, 8 e 12
Caires et al. (1999)	Rev Bras Cienc Solo	Milho, soja e trigo	Ponta Grossa, PR, BRA	3	36	0, 4, 8 e 12
Caires et al. (2002)	Sci Agric	Trigo	Ponta Grossa, PR, BRA	1	9	0, 3, 6 e 9
Caires et al. (2003)	Rev Bras Cienc Solo	Soja	Ponta Grossa, PR, BRA	3	27	0, 3, 6 e 9
Caires et al. (2004)	Rev Bras Cienc Solo	Milho	Ponta Grossa, PR, BRA	1	9	0, 3, 6 e 9
Caires et al. (2006)	Sci Agric	Soja	Ponta Grossa, PR, BRA	2	18	0, 3, 6 e 9
Caires et al. (2011a)	Soil Use Manage	Milho e soja	Ponta Grossa, PR, BRA	4	36	0, 3, 6 e 9
Caires et al. (2011b)	Sci Agric	Milho e soja	Guarapuava, PR, BRA	3	9	0, 4, 8 e 12
Caires et al. (2016)	Pedosphere	Milho	Tibagi, PR, BRA	1	9	0, 5, 10 e 15
Castañon et al. (2011)	Ciencia Tecnol	Soja	Tesouro, MT, BRA	1	5	0, 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 e 2
Costa & Crusciol (2016)	Europ J Agronomy	Soja e aveia	Botucatu, SP, BRA	3	6	0 e 2,1
Costa (2015)	Tese de doutorado	Milho	Botucatu, SP, BRA	2	4	0 e 2
Crusciol et al. (2016)	Catena	Rice	Selvíria, MS, BRA	2	8	0 e 3
Dalla Nora & Amado (2013)	Agron J	Milho e soja	Carazinho, RS, BRA	4	24	1, 2, 3, 4, 5 e 6,5
Dalla Nora et al. (2017a)	Rev Bras Cienc Solo	Milho, soja e trigo	Carazinho, RS, BRA	13	96	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 6,5
Fontoura et al. (2019)	Soil Till res	Milho, soja, aveia, trigo e cevada	Guarapuava, PR, BRA	22	264	0, 3, 6 e 9
Fois et al. (2017)	Rev Cult Saber	Milho e soja	Minga Porá, AP, PAR ²	4	12	0, 0,4, 0,8 e 1,6
Freitas et al. (2017)	J Agron Sci	Milho	Selvíria, MS, BRA	1	1	0 e 0,7
Freitas et al. (2016)	Nativa	Soja	Selvíria, MS, BRA	1	1	0 e 0,7
Galetto (2016)	Tese de doutorado	Soja e trigo	Ponta Grossa, PR, BRA	4	48	0, 2, 4 e 6
Gelain et al. (2011)	Cienc Agrotec	Soja	Maracaju, MS, BRA	1	12	0, 1, 2 e 3
Leguizamón (2017)	Dissertação de mestrado	Soja	Itakyry, AP, PAR	1	3	0, 0,4, 0,8 e 1,6
Marchesan et al. (2017)	Cienc Rural	Soja	Santa Maria, RS, BRA	2	6	0, 0,5, 1 e 1,5
Marques (2008)	Tese de doutorado	Aveia	Botucatu, SP, BRA	2	8	0 e 2,1
Meert (2013)	Dissertação de mestrado	Soja e trigo	Guarapuava, PR, BRA	2	12	0, 2, 4 e 8
Michalovicz et al. (2014)	Rev Bras Cienc Solo	Milho e cevada	Guarapuava, PR, BRA	2	8	0, 1,5, 3, 4,5 e 6
Minato et al. (2017)	Sci Agrar Paraná	Milho	Terra Roxa, PR, BRA	1	3	0, 3, 6 e 9
Neis et al. (2010)	Rev Bras Cienc Solo	Soja	Serranópolis, GO, BRA	1	4	0, 1, 2, 4 e 6
Oliveira & Pavan (1996)	Soil Till res	Soja	Ponta Grossa, PR, BRA	4	4	0 e 2
Paulleti et al. (2014)	Rev Bras Cienc Solo	Milho, soja e trigo	Jaguariaíva, PR, BRA	6	48	0, 1,5, 3, 6 e 12
Rampim et al. (2011)	Rev Bras Cienc Solo	Soja e trigo	Guaira, PR, BRA	4	20	0, 1, 2, 3, 4 e 5
Rampim et al. (2015)	Afr J Agr Res	Soja	Guaira, PR, BRA	1	12	0, 0,8, 1,6 e 2,4
Sávio et al. (2011)	Rev Agrotec	Soja	Ipameri, GO, BRA	1	6	0, 0,5, 1 e 1,5
Soares (2016)	Dissertação de mestrado	Milho e soja	Jataí, GO, BRA	2	24	0, 1, 2, 4 e 8
Somavilla et al. (2016)	Semin-Cienc Agrar	Milho e soja	Jaboticaba, RS, BRA	4	12	0, 2, 4 e 6
Soratto & Crusciol (2008a)	Rev Bras Cienc Solo	Aveia	Botucatu, SP, BRA	2	8	0 e 2,1
Soratto & Crusciol (2008b)	Agron J	Arroz	Botucatu, SP, BRA	2	8	0 e 2,1
Souza et al. (2010)	Cienc Agrotec	Soja	Dourados, MS, BRA	1	1	0 e 2
Tanaka (2013)	Tese de doutorado	Soja e trigo	La Paz, IT, PAR	2	16	0, 0,5, 1, 2 e 4
Trindade (2013)	Dissertação de mestrado	Milho e soja	B. V. Cadeado, RS, BRA	3	9	0, 2, 4 e 8
Vicensi et al. (2016)	Rev Bras Cienc Solo	Milho, soja e trigo	Guarapuava, PR, BRA	3	36	0, 3, 6 e 9
Zandoná et al. (2015)	Pesqui Agropecu Trop	Milho e soja	Barra Funda, RS, BRA	2	15	0, 0,5, 1, 2, 4 e 8
Total	-	-	-	129	930	-

¹Brasil; ²Paraguai.

controle, (iii) dose de gesso agrícola aplicada, (iv) tempo entre aplicação do gesso agrícola e cultivo das culturas, (v) ocorrência de déficit hídrico durante o cultivo (*i.e.*, considerou-se de maneira conjunta os dados de precipitação apresentados nas publicações, a produtividade das culturas em diferentes anos para o mesmo local e da descrição dos autores da ocorrência ou não de deficiência hídrica nos artigos primários), sendo que todos os cultivos foram conduzidos sem uso de irrigação, (vi) zona climática (*i.e.*, tropical ou subtropical), (vii) localização do experimento (*i.e.*, cidade, estado e país), (viii) tipo de solo (Soil Survey Staff, 2014) e sua caracterização química em subsuperfície [*i.e.*, 0,20–0,40 m (teores de argila, Ca^{2+} e Al^{3+} trocáveis, matéria orgânica e saturação por Al)].

2.2 Análise de árvore de regressão

Os principais fatores condicionantes da resposta em produtividade das culturas à aplicação de gesso agrícola foram determinados utilizando a análise de árvore de regressão no software Jmp® 13 (SAS Inc, Cary, USA). Essa análise é amplamente recomendada para uso em meta-análises, onde não se tem todos os níveis dos fatores de variação aplicados em um mesmo experimento e de maneira aleatória (Mourtzinis et al., 2018). Além disso, para o uso da análise de árvore de regressão os dados não necessitam ter uma distribuição normal e a análise é pouco influenciada pela ocorrência de *outliers* e de multicolinearidade nos dados (Tittonel et al., 2008).

As variáveis categóricas (*viz.*, espécie da cultura, zona climática, tipo de solo, disponibilidade hídrica) e variáveis contínuas (*viz.*, dose de gesso agrícola, tempo entre aplicação do gesso agrícola e cultivo das culturas, saturação por Al e teores de Ca^{2+} e Al^{3+} trocáveis e argila na camada de 0,20–0,40 m) foram incluídas na análise como fatores de variação na partição e o efeito na produtividade das culturas (%) pela aplicação do gesso agrícola como variável resposta. A análise de árvore de regressão foi baseada no teste global de nulidade da variância, ou seja, de independência ($p < 0,05$) entre as variáveis consideradas como fatores de variação e a variável resposta (incremento em produtividade). Quando essa hipótese inicial é rejeitada o algoritmo seleciona o fator de variação com maior associação com a variável

resposta (Mourtzinis et al., 2018), repetindo o mesmo processo sequencialmente em cada nó da árvore de decisão. Objetivando assegurar o poder da análise em todos os nós da árvore de decisão e para não particularizar os resultados, adotou-se que cada nó inicial e intermediário deveria conter pelo menos 20% (186 observações) do total de observações do conjunto de dados. O menor número de pares de observações no nó terminal da árvore de regressão foi de 150.

2.3 Meta-análise dos dados

A partir dos dados de produtividade de grãos das culturas nos tratamentos que receberam gesso agrícola (tratamento) e no tratamento controle, foi determinado a razão de resposta (tratamento/controle) a qual foi considerado como tamanho do efeito em nossa meta-análise (Pittelkow et al., 2015). Na sequência, obteve-se o logaritmo natural dos valores de tamanho do efeito da produtividade de grãos para cada dose de gesso avaliada. Uma vez que a grande maioria dos estudos primários utilizados na meta-análise não apresentam medidas de dispersão de suas médias (e.g., variância, desvio padrão, erro padrão), as observações foram ponderadas de acordo com o número de repetições (n) de acordo com a equação 1, conforme descrito por Pittelkow et al. (2015) e Kihara et al. (2017). Visando privilegiar resultados obtidos em diferentes ambientes (local \times ano), quando um cultivo apresentou mais de uma observação para o mesmo subgrupo de dados, o peso do cultivo foi dividido entre o número de observações.

$$\text{Peso} = \{(n \text{ controle} \times n \text{ tratamento}) \div (n \text{ controle} + n \text{ tratamento})\} \quad \text{Eq. 1}$$

onde n é número de repetições.

A partir dos resultados da análise de árvore de regressão foi determinado subgrupos de interesse (i.e., saturação por Al, ocorrência de déficit hídrico e espécie da cultura) a serem avaliados por meio da meta-análise. Em cada subgrupo dos conjuntos de dados avaliados, as observações que ultrapassaram cinco desvios padrões da mediana foram considerados *outliers* e, portanto, foram removidos do subgrupo. Para cada subgrupo

avaliado foram calculados intervalos de confiança de 95% para a média ponderada do tamanho dos efeitos através do procedimento Bootstrapping utilizando 4999 repetições (Adams et al., 1997). Considerou-se como efeito significativo da aplicação do gesso agrícola na produtividade das culturas quando os intervalos de confiança não ultrapassaram o valor zero nos gráficos de forest plot. A heterogeneidade entre os grupos foi avaliada por meio do procedimento de randomização do tamanho dos efeitos baseado em 4999 repetições, aceitando-se como significativa as diferenças quando o teste obteve valores de $p \leq 0,05$. Os procedimentos matemáticos da meta-análise foram realizadas através do software Statkey 2.0.1 (Lock et al., 2017). Ao final das análises os valores médios de tamanho dos efeitos foram transformados novamente para escala normal e apresentados como percentagem de mudança na produtividade de grãos das culturas em função da aplicação do gesso agrícola em relação ao tratamento controle (Equação 2).

$$\text{Tamanho do efeito (\%)} = [(PG \text{ tratamento} \div PG \text{ controle}) - 1] \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

onde PG tratamento e PG controle são a produtividade de grãos ($Mg \text{ ha}^{-1}$) nos tratamentos com e sem o recebimento da aplicação do gesso agrícola, respectivamente.

Seguindo metodologia de Kihara et al. (2017), além da determinação dos valores médios e de seus intervalos de confiança de 95%, foi estimada a probabilidade de obtenção de um determinado efeito na produtividade de grãos das culturas pela aplicação do gesso agrícola. Para isso gerou-se a distribuição de frequência do efeito do gesso na produtividade de grãos das culturas dentro de cada subgrupo desejado e calculou-se a probabilidade acumulada de sua ocorrência.

3. Resultados

3.1 Caracterização dos estudos com aplicação de gesso agrícola em solos sob sistema plantio direto

Estudos avaliando a resposta em produtividade de grãos das culturas à aplicação de gesso agrícola em solos sob SPD estão concentrados na região Sul do Brasil, especialmente nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul. Os estudos conduzidos nessa região perfazem 76% do número total de cultivos acessados nessa meta-análise (Figura 1c).

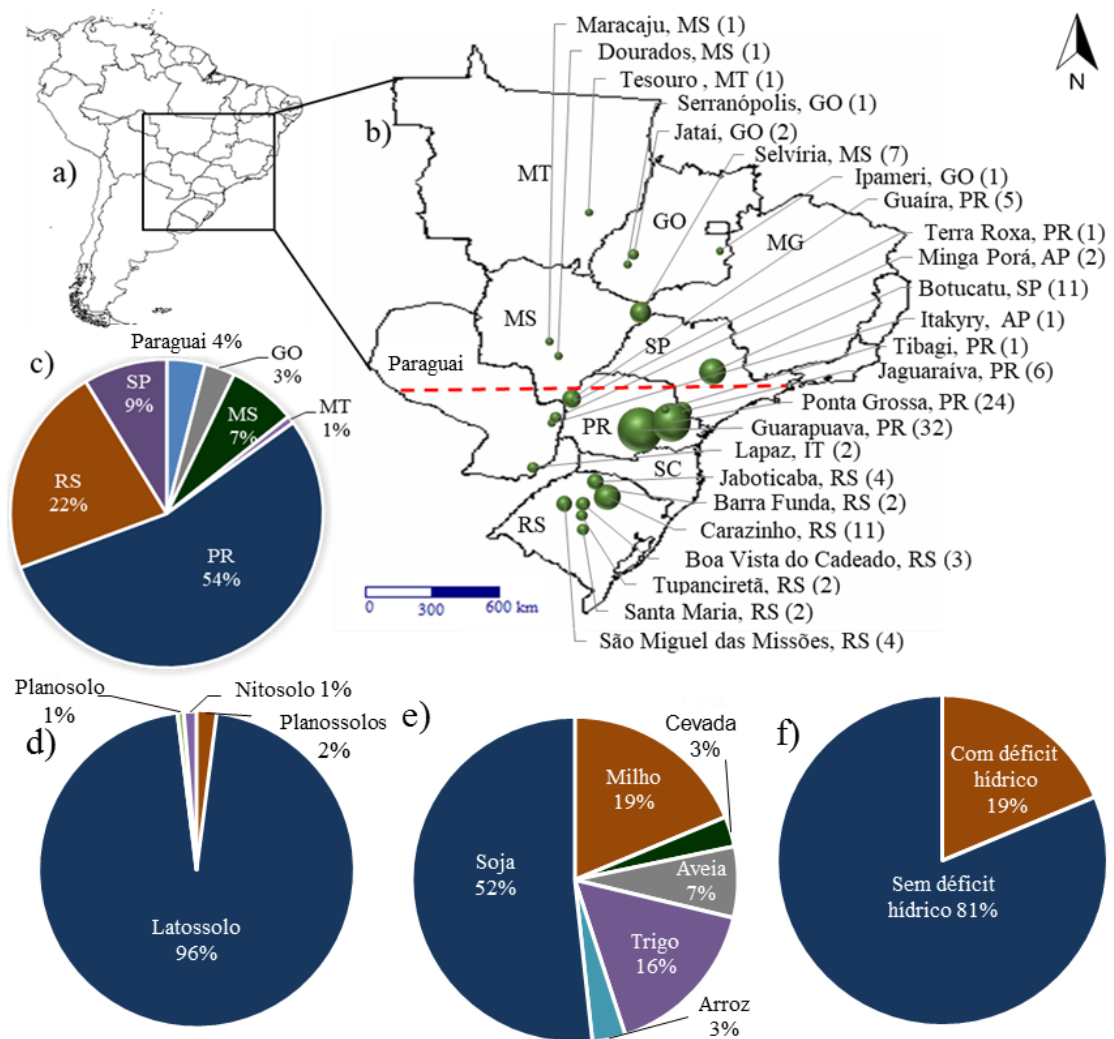


Figura 1. Localização detalhada dos locais (cidade e estado) de cultivo dos estudos primários na América do Sul (a, b) e principais características do conjunto de dados: percentagem de cultivos (ambiente x ano) realizados em cada estado do Brasil e no Paraguai (c), tipo de solo (d), cultura avaliada (e) e ocorrência de déficit hídrico durante os cultivos (f) em estudos testando a resposta das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola em solos sob sistema plantio direto. A linha vermelha tracejada na figura b mostra o limite entre a zona climática tropical e subtropical. As siglas dos estados do Brasil e Paraguai: PR: Paraná, RS: Rio Grande do Sul, MS: Mato Grosso do Sul, GO: Goiás, SP: São Paulo, MT: Mato Grosso, IT: Itapúa e AP: Alto Paraná. O número de cultivos em cada cidade é apresentado entre parênteses.

Fora do Brasil, foram encontrados estudos de gesso agrícola em SPD apenas no Paraguai, os quais representaram 4% do conjunto de dados. Do total de cultivos acessados, 89% foram conduzidos em clima subtropical e apenas 11% em clima tropical (Figura 1b). Em apenas 19% dos cultivos acessados houve a ocorrência de déficit hídrico (Figura 1f). A soja (*Glycine max L.*) foi a cultura mais estudada em relação à resposta ao gesso agrícola (52% dos cultivos), seguida pelo milho (*Zea mays L.* - 19%), e trigo (*Triticum aestivum L.* - 16%) (Figura 1e).

Em quase sua totalidade (96%), os cultivos que avaliaram o efeito do gesso agrícola na produtividade de grãos das culturas foram conduzidos em Latossolos (Figura 1d), sendo que 75% dos solos apresentavam teor de argila superior a 50% (Figura 2a). O teor de Ca^{2+} trocável na camada subsuperficial (0,20–0,40 m) do solo em 50% dos cultivos variou entre 1,0 e 3,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, porém houve solos com teores extremos, variando desde próximos a 0,0 até 8,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca^{2+} trocável (Figura 2b).

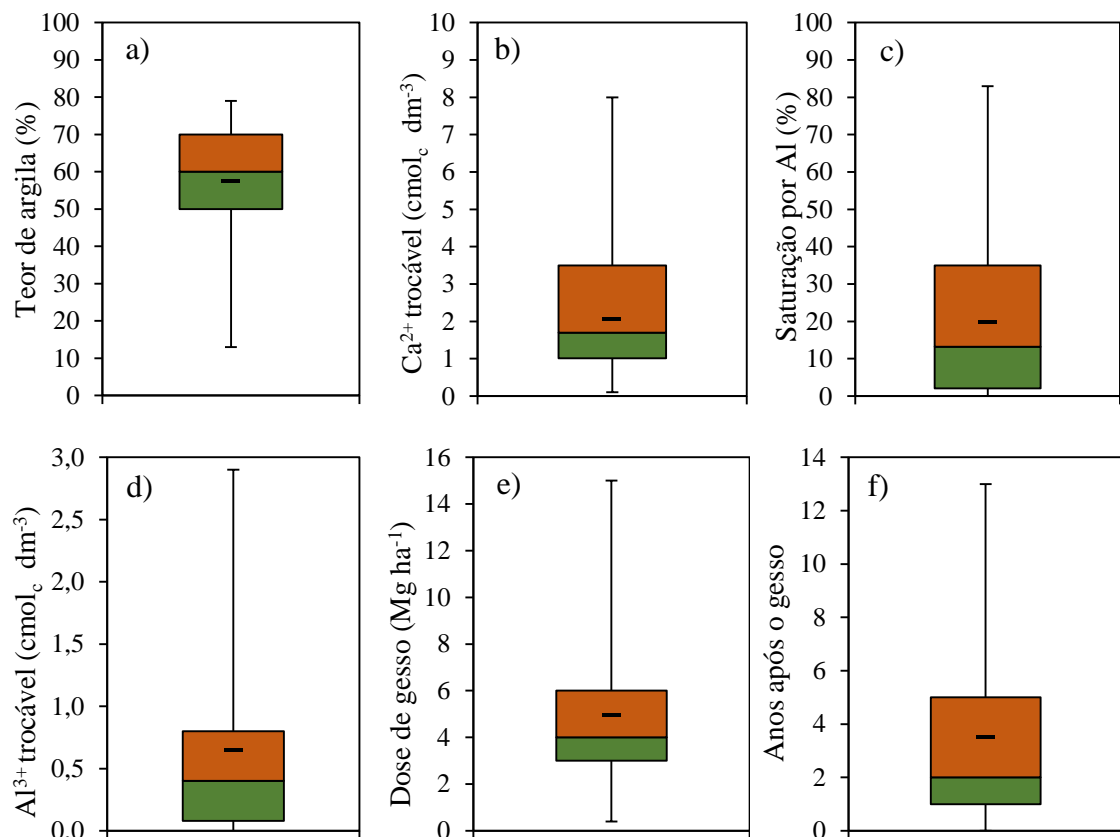


Figura 2. Medidas de posição das propriedades do solo (0,20–0,40 m): teores de Ca^{2+} trocável (a), Al^{3+} trocável (b), argila (c) e saturação por Al (d) e das doses de gesso avaliada (e) e anos entre aplicação do gesso e avaliação dos cultivos (f) do banco de dados que incluiu todos os estudos primários que avaliaram o efeito do gesso agrícola

na produtividade das culturas de grãos em sistema plantio direto. O retângulo central indica o alcance entre o primeiro e terceiro quartil do banco de dados. A linha sólida dentro do retângulo indica o valor mediano e o traço o valor médio. As linhas verticais acima e abaixo do retângulo indicam os valores mínimos e máximos, respectivamente.

Da mesma forma, os solos em que os experimentos foram conduzidos apresentaram valores de saturação por Al na camada de 0,20–0,40 m que variaram desde 0 até 83%, sendo que 75% dos cultivos foram conduzidos em solos com saturação po Al \leq 35% (Figura 2c). As doses de gesso agrícola avaliadas variaram entre 0,4 e 15 Mg ha⁻¹ (Figura 2e), havendo predominância, no entanto, para doses entre 3 e 6 Mg ha⁻¹ (50%). Avaliou-se a resposta da produtividade de grãos das culturas ao gesso agrícola tanto a curto prazo (logo após a aplicação, < 1 ano) quanto a longo prazo (até 13 anos após a aplicação) (Figura 2f), sendo que na maioria dos cultivos (50%) a resposta produtiva das culturas foi avaliada entre entre 1 e 5 anos após a aplicação do gesso agrícola.

3.2 Resposta da produtividade de grãos das culturas à aplicação de gesso agrícola

A aplicação do gesso agrícola aumentou a produtividade de grãos, na média dos cultivos avaliados, em 57% dos estudos acessados, enquanto que em 38% dos estudos a aplicação do gesso não afetou a produtividade de grãos, e em 5% dos estudos houve redução da produtividade das culturas (Figura 3). A magnitude da resposta média da produtividade das culturas ao gesso agrícola variou de +24 a -4% em relação ao tratamento controle (sem aplicação de gesso), com uma média global de incremento de todos os estudos acessados de apenas 4%.

O gesso agrícola proporcionou incrementos de diferente magnitude na produtividade de grãos entre diferentes culturas (Figura 4a), sendo que o incremento médio máximo ocorreu na cultura do milho (7,0% em média, $n = 175$) e o incremento médio mínimo na soja (1,6% em média, $n = 483$). Nas regiões de clima tropical a resposta em produtividade de grãos das culturas (4,4%) ao gesso agrícola foi 54% superior à resposta verificada em clima subtropical (2,8%) (Figura 4b).

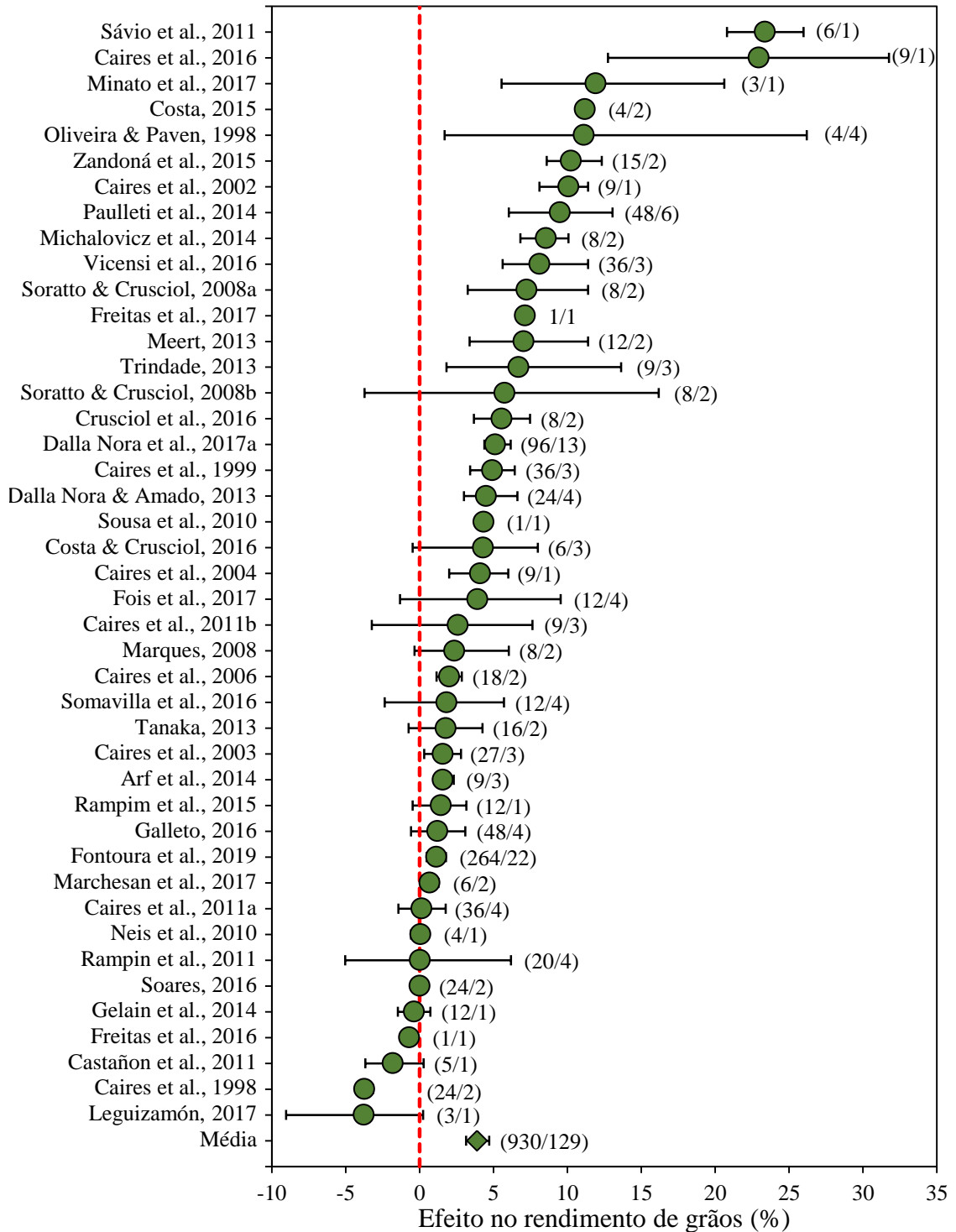


Figura 3. Efeito da aplicação de gesso agrícola no rendimento de grãos das culturas de cada estudo primário em solos sob sistema plantio direto. Barras de erro representam intervalos de confiança de 95% da média. O primeiro número após a barra de erro representa o número de pares de observações utilizadas para calcular o valor médio apresentado e o segundo número representa o número de cultivos (local x ano) em que as observações são derivadas.

A ocorrência de déficit hídrico potencializa o efeito do gesso na produtividade das culturas (+5,7% em média) em relação a cultivos conduzidos

em safras/locais com boa disponibilidade hídrica (+2,8% em média) (Figura 4c). Com excessão da cevada, todas as demais culturas apresentaram tendência de redução do incremento em produtividade (%) pela aplicação de gesso com o aumento gradual da produtividade no tratamento controle (Figura 5).

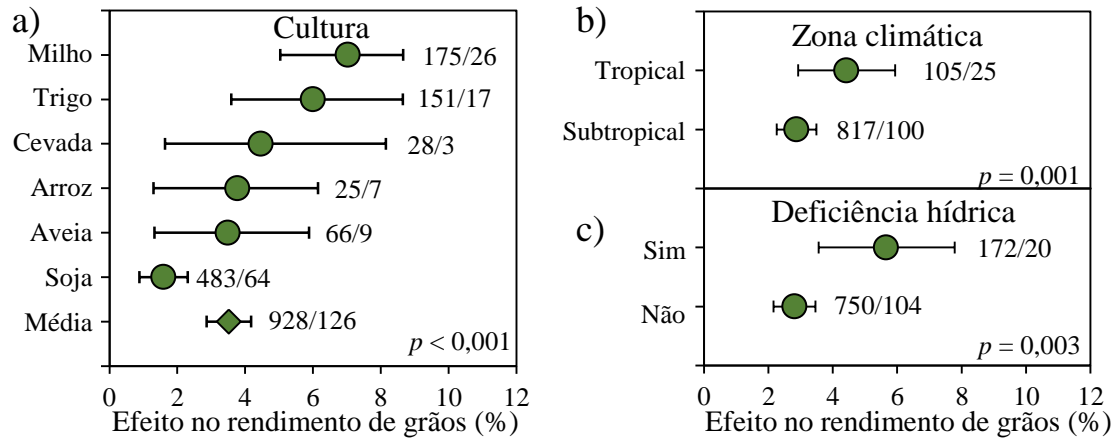


Figura 4. Efeito da aplicação de gesso agrícola no rendimento de grãos de diferentes culturas (a) em diferentes zonas climáticas (b) e com a ocorrência ou não de deficiência hídrica durante o ciclo (b). Barras de erro representam intervalos de confiança de 95% da média. O primeiro número após a barra de erro representa o número de pares de observações utilizadas para calcular o valor médio apresentado e o segundo número representa o número de cultivos (*i.e.*, local x ano) que derivaram as observações.

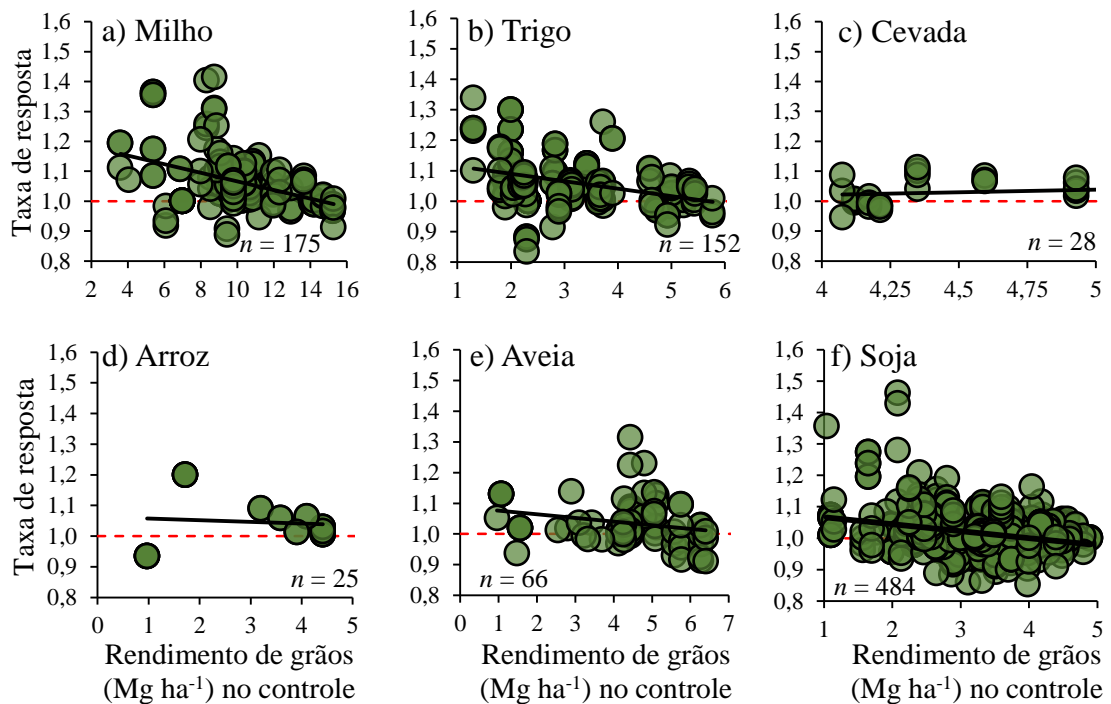


Figura 5. Taxa de resposta em rendimento de grãos do milho (a), trigo (b), cevada (c), arroz (d), aveia (e) e soja (f) à aplicação de gesso

agrícola em relação ao rendimento de grãos nos tratamentos controles. n é o número de pares de observações de cada cultura.

3.3 Árvore de regressão do efeito da aplicação de gesso agrícola na produtividade de grãos das culturas

O principal fator que promoveu distinção na resposta em produtividade de grãos pela aplicação de gesso agrícola é a espécie da cultura, onde a soja apresentou comportamento diferenciado dos cereais (milho, trigo, cevada e aveia branca e arroz, Figura 6). Na sequência, o fator mais importante foi a saturação por Al da camada subsuperficial (0,20–0,40 m) dos solos, observando-se níveis críticos de 10% para soja e de 5% para os cereais.

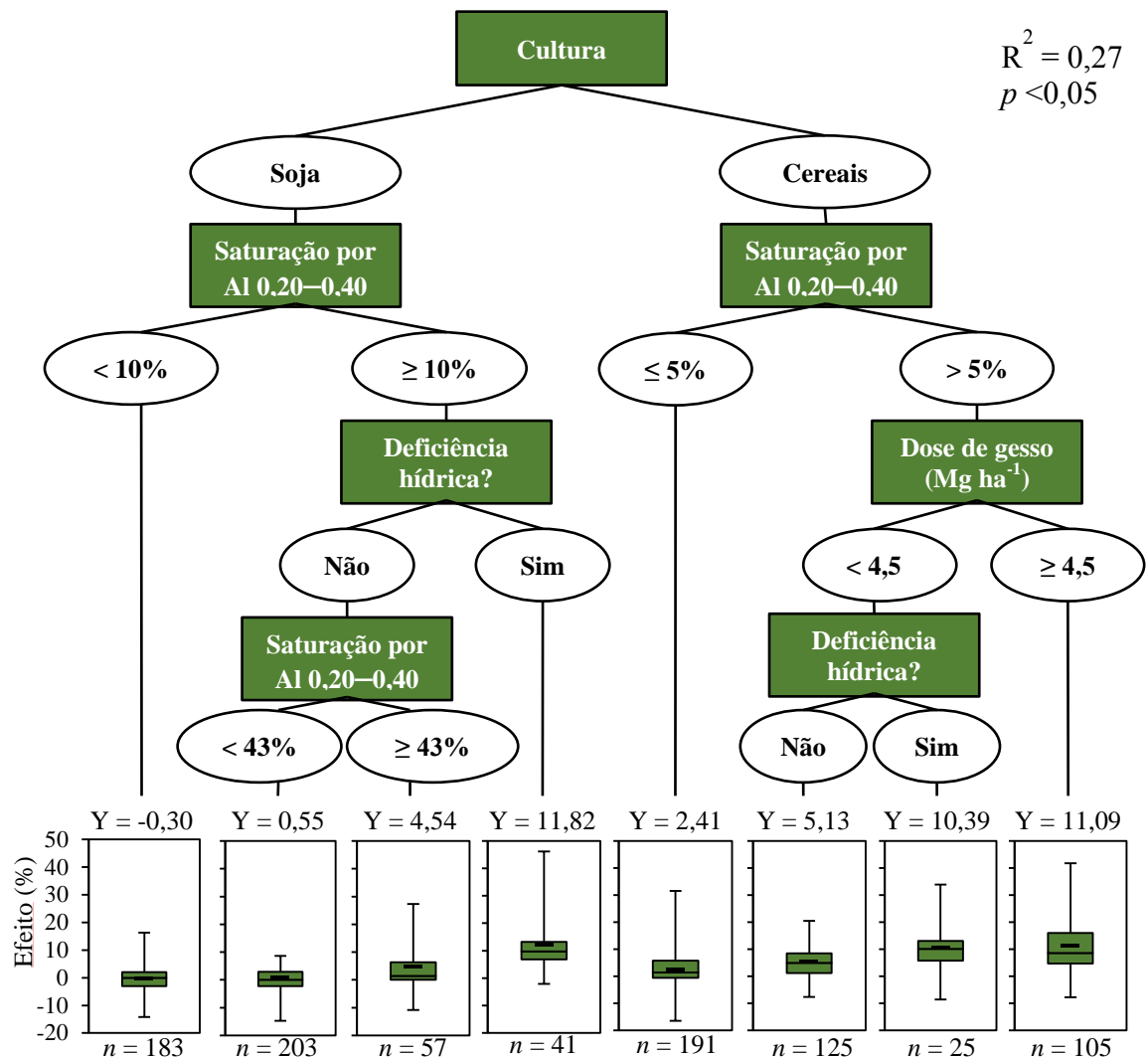


Figura 6. Árvore de regressão do efeito da aplicação de gesso no rendimento de grãos (%) das culturas em solos sob sistema plantio direto. O retângulo central nos gráficos indica o alcance entre o primeiro e terceiro quartil do

banco de dados. A linha sólida dentro do retângulo indica o valor mediano e o traço o valor médio. As linhas verticais acima e abaixo do retângulo indicam os valores mínimos e máximos, respectivamente. O efeito médio em produtividade de grãos (Y) pela aplicação do gesso agrícola é apresentado acima do gráfico e o número de pares de observações (n) que determinaram o efeito médio na parte inferior do gráfico.

Em solos com saturação por Al > 10% na camada de 0,20–0,40 m e em condições de déficit hídrico, o uso do gesso agrícola proporcionou incrementos médios de 11,8% na produtividade de grãos da soja. Por outro lado, sem a ocorrência de déficit hídrico a soja só responde ao gesso em solo com saturação por Al > 43%, incrementando em média apenas 4,5% a produtividade de grãos. Para os cereais em solos com saturação por Al > 5%, doses de gesso superiores a 4,5 Mg ha⁻¹ incrementaram em média 11,1% a produtividade. Para doses de gesso agrícola < 4,5 Mg ha⁻¹ o incremento médio na produtividade de grãos dos cereais foi de 5,1% e 10,4% para cultivos sem e com a ocorrência de déficit hídrico, respectivamente (Figura 6).

3.4 Efeito do gesso agrícola na produtividade de grãos das culturas em solos com diferentes níveis de saturação por Al³⁺ e teores de Ca²⁺ trocável

Na ausência de déficit hídrico a aplicação do gesso agrícola promoveu incrementos médios na produtividade de grãos dos cereais de 2,9% e 8,0% em solos com saturação por Al < 5% e > 40% em subsuperfície (0,20–0,40 m), respectivamente (Figura 7a). Nestas mesmas condições de ausência de déficit hídrico, a produtividade da soja incrementou apenas 4% e unicamente quando o solo apresentava saturação por Al > 40%. Em cultivos em que houve a ocorrência de déficit hídrico os cereais responderam positivamente ao gesso agrícola quando o solo apresentava saturação por Al > 5%, apresentando um incremento médio de 14% na produtividade de grãos (Figura 7b). A soja apresentou incrementos médios no rendimento de grãos de 12% em resposta ao gesso em solos com saturação por Al > 10% em subsuperfície quando da ocorrência de déficit hídrico.

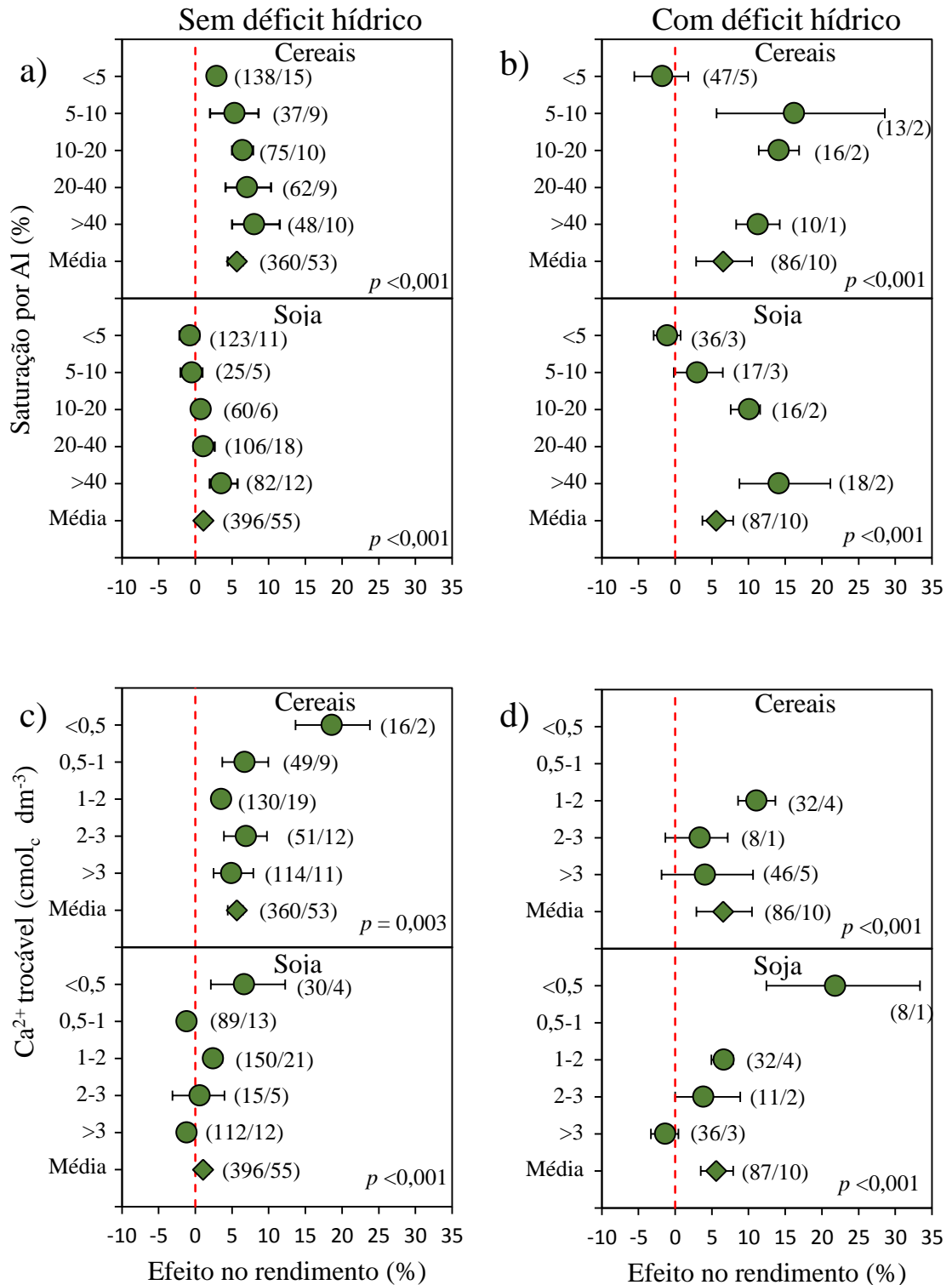


Figura 7. Efeito na produtividade de grãos dos cereais e da soja pela aplicação do gesso agrícola em subsolos (0,20–0,40 m) com diferentes saturações por Al (a, b) e teores de Ca^{2+} trocável (c, d) sem e com a ocorrência de déficit hídrico. Barras de erro representam intervalos de confiança de 95% da média. O primeiro número após a barra de erro representa o número de pares de observações utilizadas para calcular o valor médio apresentado e o segundo número representa o número de cultivos (local x ano) em que as observações são derivadas.

Houve resposta positiva dos cereais à aplicação do gesso agrícola (*i.e.*, incremento médio de 5,7%) independentemente dos teores de Ca^{2+} trocável do solo (Figura 7c). Por outro lado, a soja apresentou resposta positiva ao gesso agrícola (6,7% de incremento) apenas em solos com teores de Ca^{2+} trocável $< 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e em cultivos sem déficit hídrico. Quando houve ocorrência de déficit hídrico o gesso agrícola incrementou a produtividade tanto da soja como dos cereais apenas quando o solo apresentava teores de Ca^{2+} trocável $< 2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 7d).

Os atributos químicos dos solos em subsuperfície na implantação dos estudos mostram que os teores de Ca^{2+} trocável e de saturação por Al são inversamente relacionados ($R^2 = 0,73$, Figura 8a). Já os teores de Al^{3+} trocável apresentam relação linear com a saturação por Al ($R^2 = 0,66$, Figura 8b).

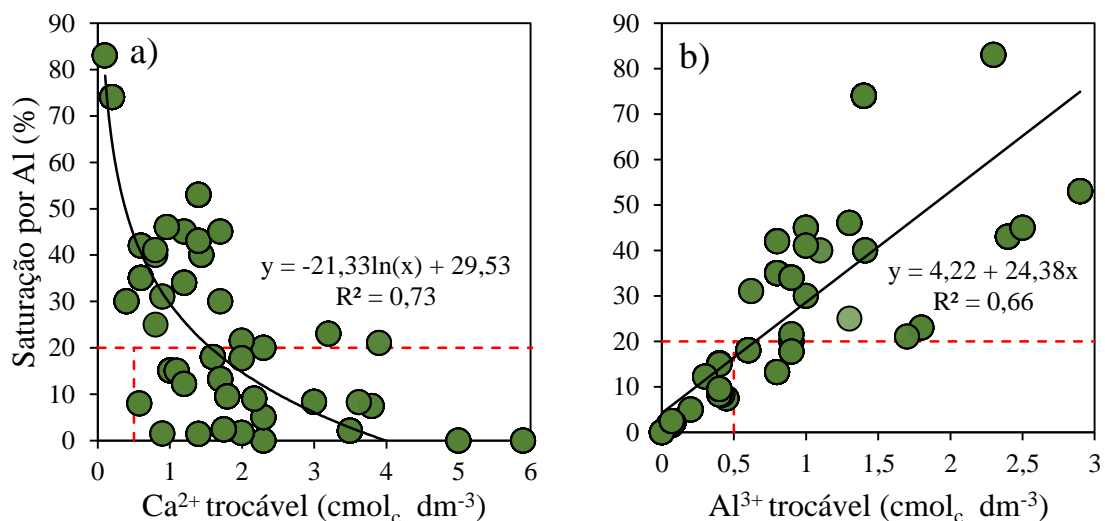


Figura 8. Relação entre os teores de Ca^{2+} (a) e Al^{3+} (b) trocáveis com a saturação por Al na camada de 0,20–0,40 m do solo antes da aplicação dos tratamentos nos estudos primários que avaliaram a reposição das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola em solos sob sistema plantio direto. As linhas pontilhadas são os níveis críticos utilizados para recomendação de gesso no Brasil, teores de Ca^{2+} trocável $\leq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou saturação por Al $\geq 20\%$ e/ou Al^{3+} trocável $\geq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Sousa et al., 2004).

3.5 Produtividade de grãos e efeito residual de diferentes doses de gesso agrícola

Os maiores incrementos em produtividade de grãos foram obtidos com as maiores doses de gesso aplicadas, independentemente da espécie da cul-

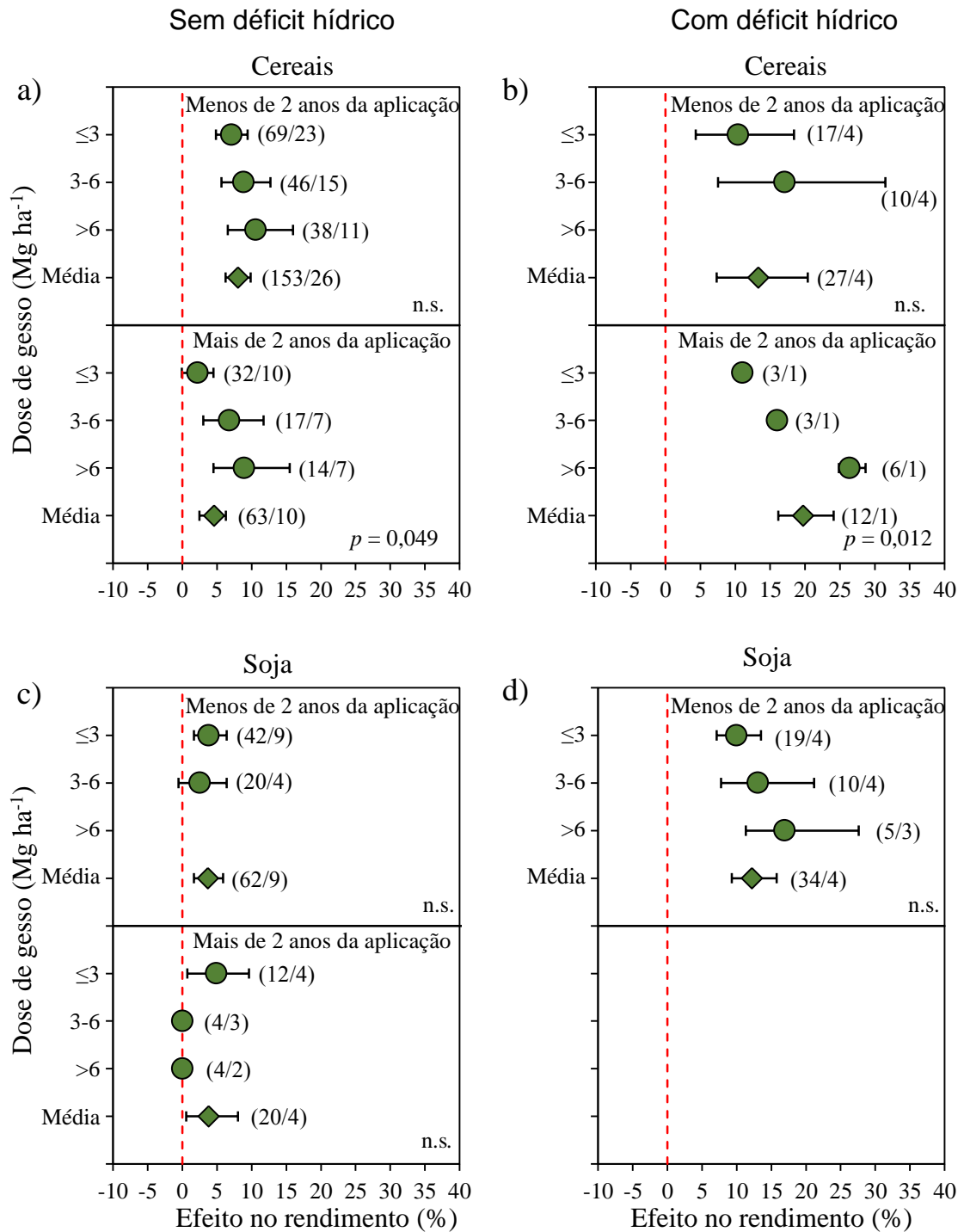


Figura 9. Efeito no rendimento de grãos dos cereais (a, b) e da soja (c, d) sem e com a ocorrência de déficit hídrico pela aplicação de diferentes doses de gesso agrícola em período inferior e superior a dois anos entre a aplicação dos tratamentos e a semeadura das culturas em solos com saturação por Al em subsuperfície (0,20–0,40 m) acima dos níveis críticos. Barras de erro representam intervalos de confiança de 95% da média. O primeiro número após a barra de erro representa o número de pares de observações utilizadas para calcular o valor médio apresentado e o segundo número representa o número de cultivos (local x ano) em que as observações são derivadas. Foram considerados como níveis críticos de saturação por Al valores superiores a 5% para os cereais e superiores a 40% e 10% para a soja conduzida sem e com a ocorrência de déficit hídrico.

tura (Figura 9). Considerando as culturas que responderam positivamente à aplicação do gesso agrícola, com e sem ocorrência de déficit hídrico (Figura 9a, 9b 9d), observa-se que doses de gesso superiores a $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ proporcionaram incrementos na produtividade de grãos em média de 12,2%, enquanto as doses inferiores a $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ incrementaram em média 6,4% a produtividade, ou seja, o uso de altas doses proporcionou aproximadamente o dobro de incremento que as menores doses.

Por outro lado, deve-se salientar que houveram diferenças estatística entre as doses de gesso aplicadas quanto ao seu efeito na produtividade das culturas apenas para os cereais com e sem déficit hídrico e com período superior a dois anos entre a aplicação do gesso agrícola e o cultivo das culturas. Para a soja com ocorrência de déficit hídrico foi obtido dados apenas para cultivos com menos de dois anos da aplicação do gesso até o seu cultivo (Figura 9d) aonde ocorreu aumento médio de 12% no rendimento de grãos.

Independentemente da dose de gesso aplicada, os incrementos em produtividade das culturas tendem a reduzir com o aumento do tempo entre a aplicação do gesso e o cultivo das culturas (Figura 9). Além disso, o efeito residual é menor quando aplicadas baixas doses de gesso ($< 3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$). Quando não ocorreu déficit hídrico, o incremento médio na produtividade de grãos dos cereais foi de 8,0% nos cultivos realizados nos primeiros dois anos após a aplicação do gesso agrícola. Após dois anos da aplicação, o incremento médio da produtividade decresceu para aproximadamente a metade (4,5%).

3.6 Probabilidade de resposta positiva das culturas à aplicação de gesso agrícola

Para o estudo de probabilidade da obtenção de resposta positiva das diferentes culturas à aplicação de gesso agrícola, tomaram-se como base os níveis críticos de saturação por Al do solo determinados pelas análises anteriores (*i.e.*, árvore de regressão e meta-análise) para cada grupo de culturas (Figuras 6 e 7). A maior probabilidade de incremento na produtividade das culturas pela aplicação de gesso ocorre em anos com a ocorrência de déficit hídrico do que em anos de boa disponibilidade hídrica (74 vs. 62%) e em

solos com acidez subsuperficial superior aos níveis críticos [5 e 10% de saturação por Al para cereais e soja, respectivamente (82 vs. 55%, Figura 10)]. Dentre as culturas, os cereais apresentaram maior probabilidade de resposta positiva ao gesso agrícola em relação à soja (77 vs. 61%), independentemente da disponibilidade hídrica ou de saturação por Al em subsuperfície (Figura 10).

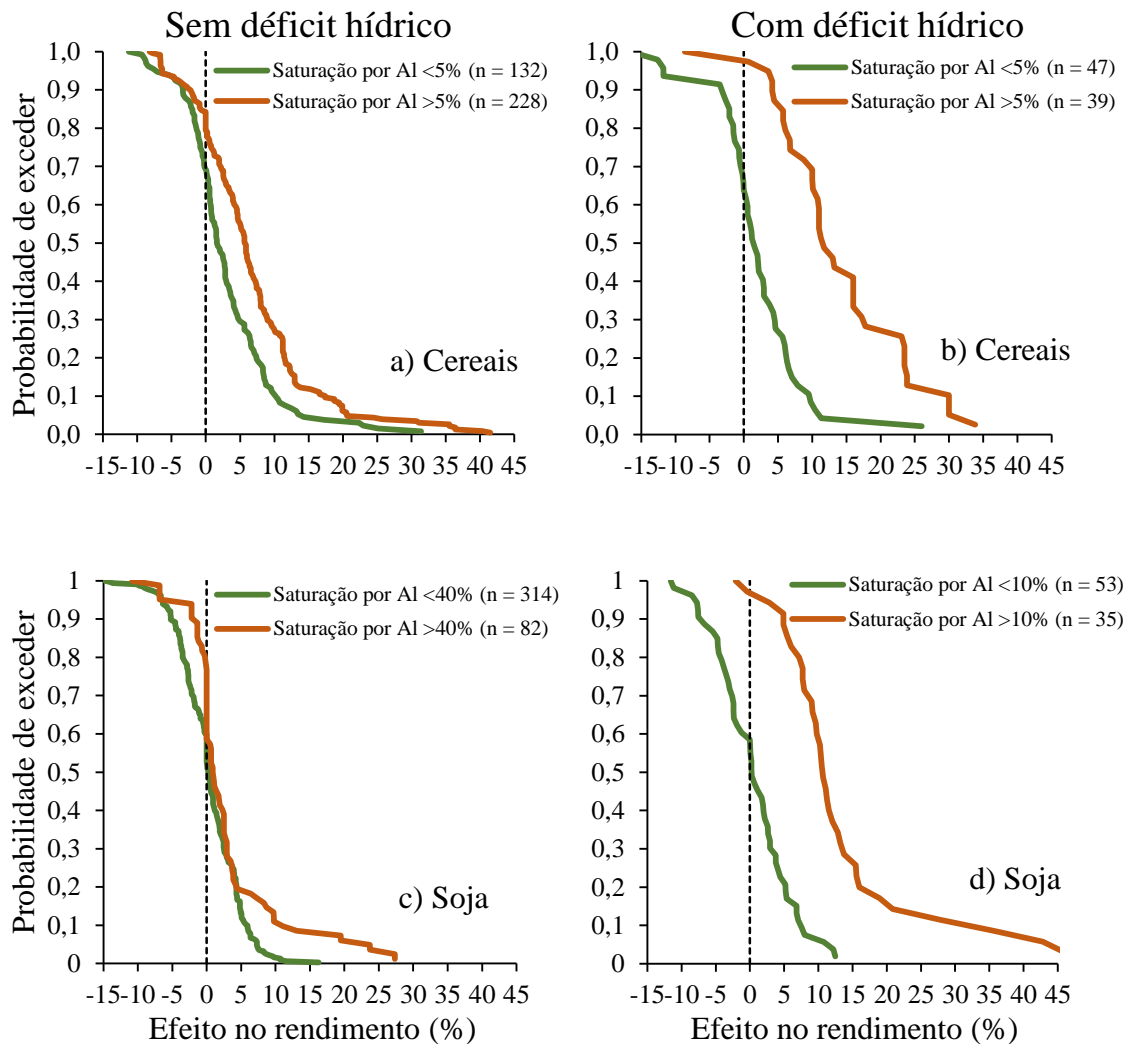


Figura 10. Probabilidade de exceder a um determinado efeito no rendimento de grãos dos cereais (a, b) e da soja (c, d) pela aplicação de gesso agrícola em solos com diferentes níveis de saturação por Al (0,20–0,40 m) conduzidos em sistema plantio direto sem e com ocorrência de déficit hídrico.

Em cultivos sem a ocorrência de déficit hídrico a probabilidade de haver incremento na produtividade dos cereais pela aplicação de gesso agrícola foi de 78% para solos com saturação por Al > 5% (Figura 10a). Ao considerarmos a probabilidade de se obter um incremento igual ou superior a

5% na produtividade de grãos a probabilidade é de 55 e 30%, para solos com saturação por Al acima e abaixo do nível crítico, respectivamente (Figura 10a). Por sua vez, a ocorrência de déficit hídrico aumenta a probabilidade de se obter incrementos pelo uso do gesso agrícola na produtividade dos cereais para 97%, e a probabilidade de incrementos superiores a 5 e 10% passam a ser de 86 e 63%, respectivamente, em solos com saturação por Al > 5% (Figura 10b).

Na ausência de déficit hídrico a cultura da soja apresentou uma baixa probabilidade de resposta positiva ao gesso agrícola (37%), sendo que a probabilidade de se obter incrementos na produtividade de grãos superior a 5% é de apenas 15% para solos com saturação por Al > 40% (Figura 10c). Por outro lado, quando ocorreu déficit hídrico a probabilidade de se obter incrementos superiores a 5 e 10% na produtividade de grãos da soja em solos com saturação por Al > 10% é de 88 e 57%, respectivamente (Figura 10d).

4 DISCUSSÃO

4.1 Respostas das culturas de grãos à aplicação de gesso agrícola

Esta meta-análise mostrou que, de maneira geral, os cereais apresentam maior potencial de resposta à aplicação do gesso agrícola do que a soja (Figura 4a e 6). A maior resposta dos cereais ao gesso em solos com alta saturação por Al em subsuperfície pode ser atribuída, ao menos em parte, ao melhor aproveitamento do nitrogênio (N) disponível no subsolo (Michalovicz et al., 2014; Caires et al., 2016). O N do solo em ambientes tropicais e subtropicais aerados permanece principalmente na forma de NO_3^- o qual é facilmente lixiviado para camadas subsuperficiais (Caires et al., 2016). Com os benefícios do gesso na redução da toxidez por Al o sistema radicular das plantas apresentam maior crescimento e aprofundamento, aumentando a absorção de N (maior eficiência dos fertilizantes nitrogenados) e reduzindo o potencial de dano ao meio ambiente (Caires et al., 2016). Esse efeito é menos importante para a cultura da soja, a qual tem sua demanda de N suprida principalmente pela fixação biológica de N (Vicensi et al., 2016). Além desse

melhor aproveitamento do N disponível, as raízes dos cereais usualmente apresentam uma menor capacidade de troca de cátions com o solo em relação à cultura da soja (Caires et al., 2011a; 2011b), o que determina uma maior habilidade da soja em absorver cátions do solo quando estes estão em baixas concentrações (Pauletti et al., 2014; Vicensi et al., 2016). Dessa forma, além da soja apresentar menor incremento em produtividade pelo uso do gesso em relação aos cereais, esse incremento ocorre apenas em solos com saturação por Al superior (> 10 e 40% para cultivos com e sem DH) aos que há resposta positiva pelos cereais [$> 5\%$ (Figura 7)].

O DH é a principal causa de variação temporal na produtividade das culturas no Brasil (Sentelhas et al., 2015). Vários estudos reportaram que as culturas apresentam maiores incrementos em produtividade pela aplicação de gesso agrícola em anos com ocorrência de DH (Pauletti et al., 2014; Somavilla et al., 2016; Vicensi et al., 2016), o que se deve ao aprofundamento do sistema radicular (Caires et al., 2016) e, conseqüentemente, maior capacidade de absorver a água retida em camadas subsuperficiais (Caires et al., 2016; Battisti et al., 2017). De maneira geral, existem poucos estudos conduzidos com gesso em condições de DH (19%, Figura 1f). Contudo, a análise desses resultados confirmaram o maior potencial de resposta de todas as culturas nessas condições, sendo que o incremento na produtividade das culturas pelo uso do gesso é praticamente duas vezes maior do que o verificado em situações de adequada disponibilidade hídrica (Figura 4c). Em cultivos sem DH o sistema radicular da soja se desenvolve principalmente na camada superficial do solo. Costa e Crusciol (2016) verificaram que mais de 80% do sistema radicular da cultura se encontravam na camada de 0,00-0,10 m de um Latossolo sob SPD com saturação por Al $> 40\%$ em subsuperfície, sendo que tanto a aplicação de gesso quanto de calcário não influenciaram na dinâmica do desenvolvimento radicular na ausência de DH. Por sua vez, quando há ocorrência de DH, a soja é favorecida pelo uso do gesso agrícola (Figura 6, 7 e 9) devido ao aprofundamento do sistema radicular que propicia um melhor aproveitamento da água e nutrientes armazenados no solo (Battisti et al., 2017).

A medida que as condições climáticas e de solo se tornam menos restritivas ao desenvolvimento das culturas (e.g., ausência de DH e baixa saturação por Al em subsuperfície) e essas obtêm níveis de produtividade

superiores, os efeitos positivos do uso do gesso agrícola se tornam mais discretos (Figura 5). Resultados similares foram reportados para a resposta das culturas ao S e micronutrientes em solos do continente Africano (Kihara et al., 2017). Todavia, mesmo sob condições favoráveis para altas produtividades, ainda é possível verificar pequenos incrementos em produtividade com aplicação do gesso (Figura 5), assim como reportado por Dalla Nora et al. (2017a).

4.2 Incremento na produtividade das culturas pela aplicação de gesso agrícola em solos com diferentes níveis de saturação por Al e de Ca^{2+} trocável

Quanto maiores os valores de saturação por Al e menores os teores de Ca^{2+} trocável em subsuperfície, maiores são os incrementos na produtividade de grãos das culturas pela aplicação do gesso (Rampin et al., 2011; Dalla Nora & Amado, 2013; Dalla Nora et al., 2017a). Como esses atributos são inversamente relacionados (Figura 8), quanto mais alta a acidez do solo maior é o impedimento químico ao desenvolvimento radicular, e, conseqüentemente, maior é o impacto negativo na produtividade das culturas (Figura 7). Nossos resultados mostraram que o uso do gesso agrícola em solos tropicais (região do Cerrado) incrementa em média, em torno de 60% a mais a produtividade das culturas do que em solos subtropicais (Sul do Brasil), apresentando, portanto, um maior potencial de uso do gesso nessa zona climática (Figura 4b). Esses resultados se devem possivelmente à intensa intemperização dos solos tropicais, os quais naturalmente apresentam elevada acidez e baixa disponibilidade de nutrientes (Costa & Crusciol, 2016). Todavia, é importante salientar o número reduzido de estudos com gesso conduzidos com culturas de grãos em solos tropicais sob SPD, os quais compreenderam apenas 11% do conjunto de dados avaliado (Figura 1b).

As atuais recomendações de gesso agrícola no Brasil para todas as culturas de grãos consideram como níveis críticos: saturação por Al $\geq 20\%$ e/ou teor de Al trocável $\geq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou teor de Ca $\leq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Sousa & Lobato, 2004; Pauletti & Motta, 2017). Em uma recente revisão sistemática, Tiecher et al. (2018) demonstraram que as atuais recomendações de uso do

gesso baseadas em experimentos sob sistema de preparo convencional na região do Cerrado brasileiro não são adequadas para solos subtropicais da região Sul do Brasil sob SPD. Além disso, estudos têm demonstrado que as culturas de grãos em SPD respondem ao gesso agrícola em condições de acidez subsuperficial bem abaixo das oficialmente recomendadas (Crusciol et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017a; Tiecher et al., 2018), o que pode estar relacionado à maior disponibilidade de cátions básicos e de S em subsuperfície quando da aplicação do gesso, além de uma possível menor tolerância à acidez e maior potencial de rendimento das cultivares/híbrido utilizados atualmente (Dalla Nora et al., 2017a).

Apesar da tendência observada na Figura 8 de que quanto menor o teor de Ca^{2+} trocável no solo em subsuperfície maior é o incremento em produtividade pela aplicação do gesso, visualiza-se um incremento em produtividade pela aplicação de gesso independente dos teores de Ca^{2+} trocável, não sendo possível definir um nível crítico de teor de Ca^{2+} trocável no solo para a tomada de decisão de aplicação ou não de gesso. Dessa forma, nossos resultados demonstraram que a utilização isolada da saturação por Al na camada subsuperficial do solo (0,20–0,40 m) é o parâmetro mais eficiente para recomendação de gesso para culturas de grãos (Figura 6), pois é um parâmetro que leva em consideração fatores importantes como a $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$ de cada solo, teores de Al^{3+} trocável e, indiretamente, a concentração de cátions básicos como Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (Figura 8). Estudos têm demonstrado que, apesar do Ca^{2+} trocável ser fundamental para o desenvolvimento radicular das plantas, apenas em baixíssimas concentrações ele causa restrições no desenvolvimento radicular e produtividade das culturas (Rosolem & Marcello, 1998; Costa e Crusciol et al., 2016). Nesse sentido, Rosolem & Marcello (1998) observaram desenvolvimento normal do sistema radicular da soja em solo com teores de Ca^{2+} trocável de $0,85 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Por sua vez, a toxidez por Al^{3+} trocável afeta expressivamente o desenvolvimento radicular (Bortoluzzi et al., 2014) mesmo em pequenas concentrações desse elemento, principalmente em solos com baixos teores de matéria orgânica, pois esta atua na complexação do Al^{3+} trocável, reduzindo sua atividade na solução do solo (Bortoluzzi et al., 2014; Joris et al., 2016).

Caires & Guimarães (2018) e Zoca & Penn (2017) citaram que apesar do gesso ser amplamente utilizado como condicionador de solos ácidos no Brasil as condições em que ele promove aumento no rendimento das culturas permaneciam desconhecidas. Considerando os resultados da árvore de decisão (Figura 6) e os resultados da meta-análise de solos com diferentes níveis de saturação por Al e de Ca^{2+} trocável (Figura 7), sugere-se que para recomendação de gesso em solos sob SPD sejam adotados os níveis críticos de 5% de saturação por Al (0,20-0,40 m) para os cereais independentemente da ocorrência de déficit hídrico, e de 10% de saturação por Al para a cultura da soja na presença de DH. Para solos com saturação por Al superior a esses níveis críticos, a aplicação de gesso agrícola aumentou na média dos cultivos em 7 e 14% a produtividade de grãos dos cereais em ambientes com ausência e presença de déficit hídrico, respectivamente. Já a soja obteve aumentos de 12% em ambientes com déficit hídrico (Figura 9). A probabilidade de resposta positiva à aplicação de gesso agrícola nesses casos é de 77 e 98% para cereais e de 57 e 88% para soja, considerando cultivos sem e com a ocorrência de DH, respectivamente (Figura 10). De maneira geral, nossos resultados mostraram que o incremento médio em produtividade ocasionado pelo gesso é modesto, o que pode explicar a ausência de efeito significativo observado em vários estudos primários (Caires et al., 2003; 2004; Soratto e Crusciol, 2008a; 2008b; Arf et al., 2014; Galetto, 2016), contudo, em solos com saturação por Al acima dos níveis críticos os efeitos mostraram-se consistentes.

A aplicação de gesso agrícola em solos com baixa saturação por Al (<10%) causou um pequeno decréscimo (0,3% na média) na produtividade da soja (Figura 6). Decréscimos significativos na produtividade da soja pela aplicação de gesso tem sido relatados na literatura (Pauletti et al., 2014; Somavilla et al., 2016). Considerando-se os níveis críticos para a soja de saturação por Al > 10% e > 40% para cultivos com e sem ocorrência de DH, respectivamente, quando os solos apresentaram acidez abaixo desta, houve uma probabilidade de 40% de haver resposta negativa da cultura ao uso do gesso. Contudo, se considerarmos uma redução na produtividade superior a 5% a probabilidade de ocorrência é de apenas 15 e 10% em condições com e sem a ocorrência de DH, respectivamente (Figura 10). Deve-se salientar que

essas reduções de produtividade pelo uso do gesso ocorrem predominantemente em solo com saturação por Al < 5% (dados não apresentados). O efeito negativo do gesso observado na produtividade de alguns cultivos em solos com baixa saturação por Al se deve possivelmente à excessiva lixiviação de Mg^{2+} e K^+ trocáveis da camada superficial e, normalmente, está associado à utilização de altas doses de gesso em concomitância com ausência de aplicação de calcário dolomítico em superfície (Caires et al., 2011a; Soratto & Crusciol, 2008b; Costa & Crusciol, 2016). Para os cereais, mesmo em solos com saturação por Al < 5%, observou-se um incremento médio de 2,4% na produtividade de grãos, o que possivelmente está relacionado ao fato do gesso ser fonte de S para as culturas (Caires et al., 1999; Neis et al., 2010).

Uma importante contribuição dessa meta-análise para o manejo do gesso em solos agrícolas foi a discriminação de níveis críticos distintos para os cereais e para a soja (Figuras 6 e 7) o que não era contemplado em recomendações anteriores (Sousa & Lobato, 2004; Pauletti & Motta, 2017). A soja é cultivada no Brasil em uma área superior a 35 milhões de ha (CONAB, 2018), sendo que muitas áreas são conduzidas em sistema de monocultivo, manejo esse que deve ser evitado devido ao baixo aporte de resíduos o qual reduz a qualidade do solo ao longo do tempo e aumenta os problemas fitossanitários. Quando em monocultivo de soja, a recomendação do gesso deve ser realizada apenas em solos com saturação por Al > 10% e em locais com alta probabilidade de ocorrer déficit hídrico (e.g., região Sul do Brasil), a fim de se obter um melhor retorno econômico da aplicação.

4.3 Dose aplicada e efeito residual do gesso

Os maiores incrementos em produtividade de grãos das culturas em solos com saturação por Al acima dos níveis críticos ocorreram com a aplicação das maiores doses de gesso (> 6 Mg ha⁻¹), tanto a curto (< 2 anos) como a longo prazo após a aplicação (> 2 anos) (Figura 9). A partir da análise da árvore de decisão, doses de gesso superiores a 4,5 Mg ha⁻¹ também apresentaram maiores incrementos na produtividade dos cereais em relação à doses menores (Figura 6). Esses resultados corroboram o efeito linear de

doses crescentes de gesso agrícola na produtividade dos cereais observado em vários estudos para pelo menos alguns cultivos (Michalovicz et al., 2014; Vicensi et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017a) em solos com elevada acidez subsuperficial. Contudo, houve diferença estatística entre as doses de gesso aplicadas apenas para os cereais com e sem DH com mais de dois anos entre a aplicação do gesso e o cultivo das culturas. Dessa forma, é importante salientar que apesar de as maiores doses de gesso terem uma tendência de resultarem em maiores incrementos em produtividade, a variabilidade de resposta dos cultivos é muito alta, devendo-se, portanto, a determinação da dose de gesso ser estudada com cautela. Além disso, o uso de altas doses de gesso deve sempre estar aliado à aplicação concomitante de calcário dolomítico afim de não haver a indução de deficiência de Mg^{2+} trocável na superfície do solo (Caires et al., 1998; Soratto et al., 2008b; Costa & Crusciol, 2016) e de principalmente proporcionar a correção efetiva da acidez do solo (aumento do pH) a médio/longo prazo (Bortoluzzi et al., 2014; Joris et al., 2016; Tiritan et al., 2016; Fontoura et al., 2019). Dalla Nora et al. (2017b) observaram maior efeito do gesso nos atributos químicos do solo em profundidade quando a camada superficial do solo estava corrigida pelo uso da calagem superficial.

O efeito residual das melhorias nos atributos do solo (redução saturação por Al e aumento dos teores de S e de cátions básicos) foram proporcionais às doses de gesso aplicada, ou seja, doses baixas de gesso tem um menor efeito residual no solo (Figura 9). Vicensi et al. (2016) avaliaram o efeito de parcelamento da dose de gesso e não constataram nenhum benefício adicional dessa prática. Essas informações referentes a resposta das culturas à diferentes doses de gesso devem ser consideradas no momento de definir o manejo do gesso caso a caso, sendo que a dose ideal pode variar de acordo com os custos do insumo, da saturação por Al do solo em subsuperfície, da rentabilidade cultura cultivada e do potencial de investimento do produtor. Dalla Nora et al. (2017b) estudando solos com diferentes níveis de acidez observaram que apenas as maiores doses avaliadas ($5-6 \text{ Mg ha}^{-1}$) foram eficientes em aumentar os teores de Ca^{2+} trocável do solo em profundidade em relação ao tratamento controle após períodos de 2,4 a 4,5 anos da aplicação. Esses resultados corroboram com os encontrados nessa meta-análise em que

quando se busca maior efeito residual do uso do gesso doses maiores devem ser preconizadas.

Existe grande dificuldade em determinar de maneira eficiente as doses de gesso agrícola a serem aplicadas em solos com diferentes níveis de acidez (Michalovicz et al., 2014; Vicensi et al., 2016). As principais recomendações no Brasil levam em consideração apenas o teor de argila do solo para recomendar a dose de gesso [Dose (Mg ha^{-1}) = 50 × teor de argila (%)] (Sousa & Lobato, 2004). Dessa forma, a dose máxima a ser recomendada dificilmente ultrapassa 4 Mg ha^{-1} (Figura 2a). Contudo, a análise conjunta da literatura nessa meta-análise demonstrou que o teor de argila dos solos não foi um fator que influencia na resposta das culturas à aplicação de gesso (Figura 6). Em uma recente publicação sobre a recomendação de gesso agrícola (Caires & Guimarães et al., 2018) em que considera a saturação por Ca^{2+} trocável na CTC da camada subsuperficial podem ser recomendadas doses mais elevadas de gesso. Contudo, em estudo conduzido por Tiecher et al. (2018) comparando metodologias de recomendação das doses com as dose de gesso que proporcionaram a máxima eficiência econômica das culturas (95% do rendimento máximo) nos diferentes estudos foi verificado que nenhuma das duas metodologias citadas apresentaram boa relação. Nessa análise sistemática da literatura, Tiecher et al. (2018) concluíram que a dose de gesso de 3 Mg ha^{-1} é suficiente na maioria dos estudos para a obtenção de pelo menos 95% do rendimento máximo das culturas. Quando se almeja a obtenção dos máximos incrementos (100% do rendimento; máxima eficiência técnica), o qual pode não ser economicamente viável, doses mais elevadas devem ser preconizadas conforme observado nesse estudo.

4.4 Limitações do uso do gesso agrícola em solos com alta acidez sob sistema plantio direto

Nossos resultados foram consistentes em mostrar que os incrementos em produtividade pela aplicação do gesso agrícola aumentam proporcionalmente ao aumento da saturação por Al do subsolo (Figura 7), corroborando com Caires & Guimarães (2018). Contudo, o uso generalizado do gesso agrícola em solos com elevada saturação por Al em subsuperfície

apresenta algumas limitações, e em algumas situações pode não ser a decisão tecnicamente mais acertada. Nesse sentido, podemos observar os resultados reportados por Dalla Nora et al. (2017b) em que avaliaram dois experimentos com alta saturação por Al e observaram que o maior efeito do gesso na saturação por Al ocorreu aproximadamente aos 30 meses após a sua aplicação sendo que após esse período a saturação por Al voltou a aumentar. Esses autores, observaram que as maiores doses de gesso testadas (5-6 Mg ha⁻¹) aos 30 meses de aplicação reduziram a saturação por Al do solo de 43 para 30% em um local e de 53 para 40% nos segundo local avaliado. Pauletti et al. (2014) também observaram que 36 meses após aplicação de gesso agrícola a saturação por Al reduziu de 60% no tratamento controle para 55% no tratamento que recebeu a dose de 12 Mg ha⁻¹.

Em estudos conduzido por Caires et al. (2002; 2006) avaliando efeito do gesso agrícola e de estratégias de calagem (superficial e incorporado) em solo com alta acidez (saturação por bases de 25% e saturação por Al de 35%, camada de 0,20–0,40 m) foi observado que o gesso incrementou a saturação por bases (de 29 para 34%) e os teores de Ca²⁺ trocável e S aos 20 meses após aplicação dos tratamentos. Contudo, aos 58 meses após a aplicação observaram-se alta lixiviação de Mg²⁺ trocável para camadas abaixo de 0,60 m, e redução do efeito do Ca²⁺ trocável, não havendo mais diferença na saturação por bases na camada subsuperficial em relação ao tratamento controle. Esses mesmos autores observaram também que a aplicação do calcário em SPD foi mais efetiva na correção da camada superficial do solo (0,00–0,05 m) como já esperado. Porém, a incorporação do calcário melhorou significativamente todos os parâmetros de acidez até os 0,20 m de profundidade, além de aumentar os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis e a saturação por bases em subsuperfície (0,20–0,40 m). Em um dos trabalhos pioneiros em SPD avaliando o efeito do gesso e da calagem Oliveira & Pavan (1996) também observaram maior efetividade do calcário incorporado em reduzir a acidez do subsolo em relação à gessagem superficial, criando um melhor ambiente para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Em solo com alta acidez ao longo do perfil, Bortoluzzi et al. (2014) observaram que a incorporação do calcário no solo propiciou a obtenção de uma produtividade da cultura da soja 30% superior à aplicação do calcário superficial o qual corrigiu apenas a camada superficial.

A acidez subsuperficial em SPD é uma problemática extremamente relevante e de ampla ocorrência em solos tropicais e subtropicais (e.g., Michalovicz et al. 2014; Caires et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017a). Contudo, é possível mitigar essa acidez subsuperficial realizando uma calagem com calcário de baixa reatividade e adequada incorporação do corretivo em profundidade no momento da implantação do SPD (Bortoluzzi et al., 2014). Contudo, em grande parte das áreas cultivadas no sul do Brasil, a transição do sistema de preparo convencional para o SPD a partir da década de 1990 foi feita sem atender plenamente aos pré-requisitos de correção do perfil do solo. Por isso, a recomendação oficial mais recente para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS RS/SC, 2016) prevê que solos manejados em SPD mas com mais de 30% de saturação por Al na camada de 0,10–0,20 m podem ser submetidos à calagem com incorporação do corretivo com aração e gradagem, para assim reiniciar o SPD sem restrições químicas em subsuperfície. Nesses casos, a incorporação do calcário antes da implantação do SPD provou ser mais rápida e eficiente em mitigar a acidez do solo do que a calagem superficial, além disso, é adequada para a correção de camadas subsuperficiais (Rheinheimer et al., 2018a).

Diante dos resultados apresentados em diferentes estudos, pode-se inferir que mesmo o gesso sendo eficiente em reduzir os efeitos indesejáveis da acidez subsuperficial do solo ele atua como uma medida paliativa em solos com alta acidez, pois o subsolo permanece com níveis de acidez muito acima dos desejados, e com isso mantém-se as limitações para a produtividade máxima das culturas. A grande vantagem do calcário em relação ao gesso em corrigir o subsolo é que ao aumentar o pH ocorre, conseqüentemente, a formação de cargas elétricas negativas (aumento da CTC do solo) nos coloides do solo e com isso os cátions conseguem ficar retidos no subsolo, garantindo portanto, um efeito residual muito superior (Oliveira & Pavan, 1996). Rheinheimer et al. (2018) observaram que mesmo após 18 anos da incorporação do calcário o solo havia recuperado apenas 30% da acidez potencial inicial, comprovando o alto efeito residual da calagem. Por outro lado, como o gesso não gera cargas elétricas no solo (ausência de efeito no pH) para que os cátions acompanhantes do SO_4^{2-} sejam retidos, há a necessidade

de deslocar outros cátions dos coloides, e isso favorece lixiviação para camadas abaixo da zona de absorção radicular (Caires et al., 2006).

Estudos com calagem têm demonstrado que em solos bem manejados, com altos teores de matéria orgânica e bem estruturados, a calagem superficial tem rapidamente afetado camadas subsuperficiais (Oliveira & Pavan, 1996; Tiritan et al., 2016; Fontoura et al., 2019). Por outro lado, em solos de baixa qualidade estrutural esse efeito é praticamente inexistente (Bortoluzzi et al., 2014; Joris et al., 2016). Portanto, a decisão de reiniciar ou não o SPD a partir da incorporação do calcário para corrigir o solo em profundidade deve ser tomada considerando uma série de fatores como a acidez do solo em profundidade, os teores de matéria orgânica, a qualidade estrutural do solo, a presença de impedimentos físicos do solo e a produtividade de grãos obtidas nos últimos cultivos.

Na Figura 11 é apresentado uma sugestão de manejo de subsolos ácidos em solos conduzidos em SPD. Para solos com saturação por Al inferior ao nível crítico não se recomenda a aplicação do gesso, pois os incrementos em produtividade quando ocorrem são muito baixos não justificando o investimento (Figuras 6 e 7). Nesses solos, o gesso pode ser utilizado apenas visando o suprimento de enxofre, sendo que para essa finalidade a dose deve ser entre 150–200 kg ha⁻¹ (CQFS RS/SC, 2016).

Estratégias de manejo da acidez subsuperficial em SPD


Cultura		Aumento da saturação por Al em subsuperfície (0,20–0,40 m)		
 Milho/ cereais Soja	Saturação por Al <5%: Sem recomendação	Saturação por Al 5–40%: Gesso + calagem superficial*		Saturação por Al >40%: Incorporação do calcário e reinício do SPD
	Saturação por Al <10%: Sem recomendação	Saturação por Al 10–40%: Gesso + calagem superficial		

Figura 11. Sugestões de manejo da camada subsuperficial de solos sob sistema plantio direto de acordo com os níveis de saturação por Al. *O uso da calagem superficial, em concomitância com gesso, apesar de ser desejável é dependente dos parâmetros de acidez da camada superficial para sua recomendação.

Solos que apresentam saturação por Al mediana em subsuperfície (5–40% e 10–40% para cereais e soja, respectivamente) é aonde deve-se recomendar o uso do gesso agrícola visando amenizar o efeito fitotóxico do Al³⁺ trocável, e dessa forma, favorecer o desenvolvimento radicular das culturas (Caires et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017b). Para esses solos sempre que possível deve-se realizar a calagem superficial anteriormente à aplicação do gesso, devendo-se para o uso do calagem superficial considerar a acidez da camada superficial. Com o maior desenvolvimento de raízes em subsuperfície pelo efeito amenizador da acidez do gesso espera-se que a médio/longo prazo a descida do calcário no perfil do solo seja mais rápida devido a maior presença de bioporos e, dessa forma, ocorra a efetiva correção da camada subsuperficial do solo. Para solos com saturação por Al em subsuperfície superior a 40% o melhor manejo na maioria dos casos, devido a alta limitação química e possivelmente a fraca estrutura do solo e possíveis problemas com compactação é a realização da calagem e incorporação do corretivo no solo. De maneira geral, dificilmente se consegue incorporar o calcário até a profundidade de 0,40 m devido às limitações dos maquinários, contudo, resolverá os problemas das camadas até 0,20 ou 0,30 m e a frente de alcalinização estará bem mais próxima de alcançar os 0,40 m desejados (Rheinheimer et al., 2018b).

4.5 Perspectivas futuras para estudos com gesso agrícola em solos ácidos

Embora a maioria dos solos aráveis do planeta sejam ácidos pesquisas com uso do gesso para atenuar os efeitos indesejados da acidez do solo em subsuperfície praticamente se restringem às condições brasileiras (96%). No Brasil a maioria dos estudos com gesso em solos sob SPD foram conduzidos na região Sul (76%), onde o clima é subtropical e os solos são menos intemperizados que o restante do país (Figura 1 e 2). Portanto, há uma carência de literatura científica advinda da região central do Brasil, principal produtora de grãos, bem como de importantes regiões de expansão da agricultura, como a região do MAPITOBA (*viz.*, estados do Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia), considerada a última e maior fronteira agrícola brasileira.

Além disso, são necessários estudos em outras regiões tropicais, como países latino-americanos e africanos (Kihara et al., 2017).

A expansão de estudos com gesso para outras regiões certamente também implicará na diversificação das condições de solos e culturas estudadas. Atualmente a grande maioria dos estudos se concentra em Latossolos (96%) argilosos (75% com argila > 50%), e com as culturas da soja (a qual apresenta limitada resposta ao gesso), milho e trigo (87%) (Figuras 1 e 2). Entretanto, a análise da literatura demonstrou que a resposta ao gesso é variável entre as espécies de cultura (Figura 4a) e, portanto, estudos incluindo outras culturas utilizadas em planos de rotação e de grande importância econômica e social, tais como feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), canola (*Brassica napus* L.), girassol (*Helianthus annuus* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e centeio (*Secale cereale* L.) são fundamentais para compreender o efeito do gesso nestas culturas e, conseqüentemente, melhorar os critérios de recomendação e o manejo desse insumo em sistemas de cultivo diversificados. Estudos futuros também devem buscar avaliar o tempo de efeito residual do gesso agrícola, tendo em vista que, dos estudos disponíveis, a maioria concentrou-se nos efeitos a curto prazo após aplicação dos tratamentos (< 2 anos) (Figura 2f). A determinação do efeito residual do gesso é fundamental para a análise de viabilidade econômica do uso do gesso agrícola nas diferentes condições ambientais (Dalla Nora et al., 2017a).

5. Conclusões

A resposta das culturas à aplicação do gesso agrícola é potencializada em solos com alta saturação por Al em subsuperfície e pela ocorrência de déficit hídrico. Os cereais (*i.e.*, milho, trigo, cevada, aveia e arroz) apresentam maior sensibilidade à acidez subsuperficial do solo em relação à soja, apresentando, portanto, maior potencial de resposta à aplicação de gesso agrícola. Para cultivos com cereais o gesso deve ser recomendado em solos com saturação por Al superior a 5% em subsuperfície. Para a soja o gesso deve ser recomendado em solos com saturação por Al superior a 10% em subsuperfície e unicamente em ambientes com alta probabilidade de ocorrência de déficit hídrico.

Para subsolos com saturação por Al superior aos níveis críticos estabelecidos nesse estudo a aplicação de gesso agrícola incrementa em média a produtividade dos cereais em 14 e 7% para cultivos com e sem a ocorrência de déficit hídrico, com probabilidade de ocorrência de resposta positiva de 77 e 97%, respectivamente. Cultivos de soja apresentam respostas ao gesso agrícola apenas na concomitância de saturação por Al superior a 10% e da presença de déficit hídrico, havendo incrementa médio de 12% no rendimento de grãos, e probabilidade de resposta positiva da cultura de 88%. Dessa forma, a utilização de gesso agrícola como medida paliativa em solos com mediana saturação por Al na camada subsuperficial (5–40%) conduzidos em sistema plantio direto é uma eficiente estratégia para reduzir o gradiente de nutrientes no perfil do solo e com isso aumentar a produtividade das culturas e contribuir para a sustentabilidade agrícola e ambiental. Contudo, em solos com saturação por Al muito alta (> 40%) o gesso agrícola apresenta efeito limitado na melhoria das propriedades químicas do solo, devendo-se nesses casos considerar a possibilidade de correção do solo em profundidade com o uso do calcário incorporado e o reinício do sistema plantio direto. Para solos com baixa saturação por Al (< 5%) o uso do gesso deve ser evitado devido ao aumento desnecessário do custo de produção, ausência de resposta positiva das culturas e, possibilidade de afetar negativamente a produtividade de grãos devido à lixiviação excessiva de Mg^{2+} trocável da camada superficial causando uma deficiência induzida nas plantas.

CAPÍTULO II – DOSES DE GESSO E CALCÁRIOS COM DIFERENTES REATIVIDADES NA ACIDEZ DO SOLO E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DAS CULTURAS EM UM LATOSSOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO⁴

1. Introdução

Em solos tropicais e subtropicais a acidez e a baixa disponibilidade de nutrientes são os principais fatores que restringem a produtividade das culturas (Fageria & Nascente et al., 2014; Joris et al., 2016; Tiritan et al., 2016). Solos ácidos ($\text{pH}_{\text{água}} < 5,5$), representam aproximadamente 78% de toda a área potencialmente cultivável em nível mundial (Von Uexküll & Mutert, 1995). A calagem é a prática mais amplamente difundida para correção da acidez do solo, promovendo a redução da toxidez por Al^{3+} trocável e Mn^{2+} disponível (Tiritan et al., 2016; Rheinheimer et al., 2018b) e aumento da disponibilidade dos nutrientes essenciais às plantas (Crusciol et al., 2016; Joris et al., 2016), com reflexos também na melhoria de atributos físicos (Bennett et al., 2014) e biológicos do solo (Holland et al., 2018).

Apesar dos benefícios da calagem nos atributos do solo serem bem entendidos (Fageria & Nascente et al., 2014), a intensidade de seus efeitos utilizando calcários com diferentes reatividades (granulometria) em solos sob SPD tem sido pouco explorado, tanto no que se refere ao efeito a curto prazo e especialmente quanto ao efeito residual (Gonçalves et al., 2011; Rodighero et al., 2015). O parcelamento do calcário visando evitar a alcalinização da camada superficial e a indução de deficiência de micronutrientes

⁴ Artigo publicado na revista **Soil & Tillage Research**, v. 193, n. 1, p. 27–41, 2019. doi: 10.1016/j.still.2019.05.005.

(e.g., Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+}) e/ou a concentração do sistema radicular das culturas em superfície, também são aspectos que necessitam mais pesquisas (Bortoluzzi et al., 2014; Martins et al., 2014; Joris et al., 2016; Tiritan et al., 2016; Rheinheimer et al., 2018a), devido ao seu potencial impacto negativo na produtividade das culturas, principalmente em anos com déficit hídrico (Tiecher et al., 2018). Além disso, o conhecimento dos efeitos da acidez em SPD na produtividade de diferentes culturas ainda é incipiente, pois não há uma relação direta entre os atributos ligados à acidez e a produtividade das culturas, ao contrário do que se verifica em solos conduzidos em sistema de preparo convencional (Martins et al., 2014). Nesse sentido, a resposta das culturas à aplicação superficial de calcário em SPD tem sido amplamente variável e dependente do nível de acidez, teor de matéria orgânica e qualidade estrutural do solo, além da intrínseca tolerância à acidez da cultura e/ou variedade/cultivar (Pauletti et al., 2014; Fageria & Nascente, 2014; Martins et al., 2014; Crusciol et al., 2016).

No SPD, utilizado em aproximadamente 157 Mha em nível mundial e em 32,8 Mha no Brasil (FEBRAPDP, 2018), o calcário é usualmente aplicado na superfície do solo sem a tradicional incorporação do corretivo (Rheinheimer et al., 2018b), promovendo uma rápida correção da acidez nas camadas superficiais (Caires et al., 2011; Rampim et al., 2011; Dalla Nora et al., 2013; Calegari et al., 2013; Bortoluzzi et al., 2014; Crusciol et al., 2016; Joris et al., 2016). Contudo, devido à baixa solubilidade do calcário, seus benefícios em subsuperfície (e.g., abaixo de 0,20 m) podem não ser consistentes, resultando em limitações ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas (e.g., alta saturação por Al e baixos teores de cátions básicos), resultando em menor absorção de água, nutrientes e produtividade de grãos, principalmente em anos com ocorrência de déficit hídrico (Dalla Nora & Amado, 2013; Bortoluzzi et al., 2014; Pauletti et al., 2014; Zandoná et al., 2015; Dalla Nora et al., 2017b; Crusciol et al., 2016; Tiecher et al., 2018).

Devido à baixa solubilidade e, por consequência, a lenta descida do calcário em solos agrícolas, o uso de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) tem sido preconizado como condicionador de solo (Ritchey et al., 1980), especialmente em áreas de SPD. A solubilidade ($2,5 \text{ g L}^{-1}$) do gesso agrícola é, aproximadamente 150 vezes maior do que a do calcário (Bennett et al., 2014;

Crusciol et al., 2016), possibilitando alta mobilidade de cátions básicos (*i.e.*, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis) associado a ânions (*i.e.*, SO_4^{2-}) que em profundidade se dissociam e podem ligar-se ao Al^{3+} trocável, diminuindo a sua atividade e toxicidade às plantas (Pauletti et al., 2014; Crusciol et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017b; Zocca & Penn, 2017). Além do seu efeito condicionador, o gesso agrícola é também uma fonte rica em Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} (Bennett et al., 2014; Zocca & Penn, 2017). A deficiência de S em solos agrícolas tem sido amplamente reportada na literatura para vários locais do mundo como Europa (Ercoli et al., 2012), África (Kihara et al., 2017) e América do Sul (Tiecher et al., 2013; Salvagiotti et al., 2017; Pias et al., 2019).

Estudos avaliando a interação entre calagem e gesso agrícola nas propriedades do solo e produtividade das culturas estão bem documentados na literatura, especialmente em solos sob SPD (Caires et al., 2006; 2011; Pauletti et al., 2014; Crusciol et al., 2016; Costa & Crusciol 2016, Dalla Nora et al., 2017a). No entanto, não temos conhecimento de estudos avaliando o efeito de calcários com diferentes reatividades e o parcelamento de doses de calcário combinadas com doses de gesso. Além disso, a maioria dos estudos avaliaram os efeitos do gesso e da calagem em um pequeno número de cultivos [dois (Caires et al., 2006; Dalla Nora & Amado, 2013 Crusciol et al., 2016), quatro (Caires et al., 2011; Costa & Crusciol 2016) e seis cultivos (Pauletti et al., 2014; Dalla Nora et al., 2017a)]. Além disso, os resultados obtidos nesses estudos são em sua maioria contrastantes. Em comum, todos os autores reportaram a necessidade de se conduzir estudos de longa duração para avaliar o efeito residual do gesso e da calagem, os quais podem persistir por mais de duas décadas como reportado para o calcário por Rheinheimer et al. (2018a). Portanto, o presente estudo apresenta uma oportunidade única de avaliar o efeito de estratégias de calagem e de doses de gesso agrícola nas propriedades químicas do solo e na produtividade de grãos de 22 cultivos, englobando seis culturas, em um longo período de 12 anos.

A recomendação atual para aplicação de gesso agrícola no Brasil, a qual foi determinada em sistema de preparo convencional, utiliza como nível crítico a saturação por Al $\geq 20\%$ e/ou teor de Ca^{2+} trocável $\leq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou teor de Al^{3+} trocável $\geq 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Pauletti & Motta, 2017). Contudo, estudos recentes conduzidos em solos sob SPD têm demonstrado que a

utilização do gesso agrícola proporciona benefícios aos cultivos mesmo em solos com saturação por Al inferior a 10% (Crusciol et al., 2016; Dalla Nora et al., 2017b; Tiecher et al., 2018), o que pode estar relacionado à maior disponibilidade de cátions básicos e de $S-SO_4^{2-}$ em subsuperfície, além de uma possível menor tolerância à acidez, ao aumento do potencial produtivo e à redução do ciclo das atuais cultivares/híbridos gerando, conseqüentemente, maior demanda por nutrientes (Dalla Nora et al., 2017a). A resposta das culturas ao gesso em solos com alta acidez subsuperficial (saturação por Al > 20%) está bem documentada (Pauletti et al., 2014; Caires et al., 2016; Costa & Crusciol, 2016), porém, para solos com baixa acidez subsuperficial (saturação por Al \leq 10%) o conhecimento atual ainda é incipiente (Dalla Nora et al., 2017b).

As hipóteses testadas neste estudo foram:

(i) A aplicação combinada de calcário e gesso agrícola num Latossolo com moderada acidez ao longo do perfil em SPD de longa duração, proporciona melhores condições de solo em camadas subsuperficiais no curto prazo induzidas pelo efeito do gesso agrícola e a longo prazo devido ao efeito do calcário na correção da acidez e aumento na disponibilidade de nutrientes.

(ii) Em solo com moderada acidez, a aplicação de calcário de baixa reatividade é tão eficiente quanto o de alta reatividade a curto prazo, porém apresenta um maior efeito residual.

(iii) A aplicação parcelada de doses de calcário de alta reatividade aumenta o seu efeito residual nas propriedades relacionadas à acidez do solo e na produtividade das culturas.

Essas três hipóteses foram testadas a partir da condução de um estudo de longa duração em um Latossolo sob SPD no subtropical brasileiro. Os objetivos deste estudo foram avaliar a eficiência de diferentes estratégias de calagem e da aplicação de gesso agrícola em aumentar a produtividade das culturas e em corrigir a acidez ao longo do perfil do solo a curto (1 ano) e longo prazo (11 anos).

2. Material e métodos

2.1 Descrição da região e da área experimental

O estudo foi baseado num experimento de campo conduzido por 13 anos (2004–2017) em área da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA), no município de Guarapuava, PR, Sul do Brasil (coordenadas centrais 25° 50'S e 51°30'O). O clima da região é subtropical úmido, do tipo Cfb (classificação de Köppen-Geiger) com temperatura e precipitação média anual de 16,9 °C e 1956 mm, respectivamente. Os dados de precipitação mensal durante o período experimental e precipitação acumulada em cada cultivo foram obtidos de estação meteorológica automática localizada a 2 km do experimento, conforme apresentado na Figura 12. A precipitação média dos últimos 40 anos (normal climatológica) também é apresentada na Figura 12, visando observar se a precipitação que ocorrera nas respectivas safras foram acima ou abaixo da média histórica.

O solo da área experimental é um Latossolo Bruno de acordo com Santos et al., (2013) [clayey Typic Hapludox (Soil Survey Staff, 2014)] e vinha sendo cultivado em SPD há mais de 25 anos. A condição inicial dos atributos químicos do solo quando da implantação do experimento é apresentada na Tabela 2. Segundo as recomendações atuais o solo apresentava altos teores de P e K, porém necessitava de calagem (*i.e.*, V < 60% e pH < 5,5) (Pauletti & Motta, 2017).

O experimento seguiu um delineamento de blocos casualizados, com parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas principais (25,6 × 12 m) foram constituídas por três estratégias de calagem: (i) 4,62 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico de baixa reatividade [poder relativo de neutralização total (PRNT) de 76%], (ii) 3,47 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico de alta reatividade (PRNT 101%), e (iii) 3,47 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico de alta reatividade (PRNT 101%) parcelado em três aplicações anuais (início, e após 1 e 2 anos) além de um tratamento controle (sem calagem). As subparcelas (6,4 × 12 m) foram constituídas por quatro doses de gesso agrícola: 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹. Mais informações sobre a composição dos calcários e do gesso utilizado no experimento são apresentadas no Apêndice 1.

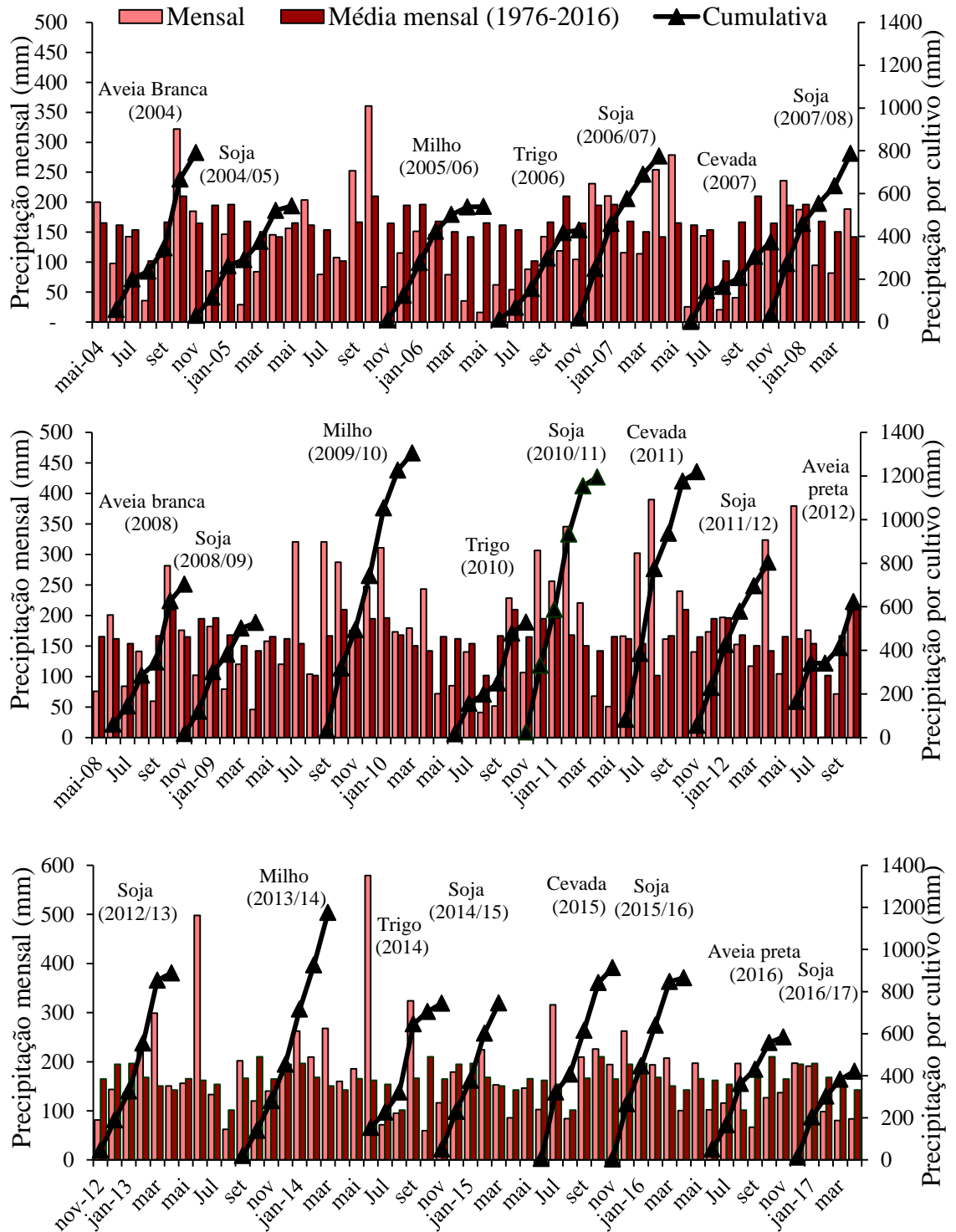


Figura 12. Precipitação mensal durante a condução do experimento (2004–2017), precipitação média histórica (1976–2016) e precipitação acumulada em cada cultivo em Guarapuava, PR.

A necessidade de calagem (NC) foi determinada pelo método da saturação por bases (Equação 1) tendo como base a camada de 0,00–0,20 m, objetivando elevar a saturação por bases a 70% (Pauletti & Motta, 2017).

$$NC \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{[(V_2 - V_1) \times CTC_{\text{pH } 7.0}]}{\text{PRNT}} \quad \text{Eq.1}$$

Onde: V_1 é a saturação por bases inicial, V_2 a saturação por bases desejada, CTC_{pH_7} refere-se a CTC potencial do solo e PRNT (%) é o poder relativo de neutralização total do calcário utilizado.

A aplicação do calcário e do gesso agrícola foram realizadas manualmente e a lanço na superfície do solo em maio de 2004. A área foi conduzida durante todo o experimento em SPD, sem revolvimento do solo.

Tabela 2. Propriedades químicas do solo no início do experimento em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

Camada do solo (m)	pH _{água}	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC ⁽¹⁾	P	S-SO ₄ ²⁻	CO ⁽²⁾	V ⁽³⁾	m ⁽⁴⁾
		-----cmol _c dm ⁻³ -----						---mg dm ⁻³ ---	g dm ⁻³	-----%-----		
0,00–0,10	5,3	0,1	7,8	5,8	2,3	0,5	16,4	28,0	9,0	31,1	52,9	0,9
0,10–0,20	5,4	0,1	7,8	5,1	1,8	0,3	15,0	8,9	11,0	24,1	48,2	0,7
0,20–0,40	5,2	0,1	8,4	3,5	1,9	0,2	14,0	3,5	14,0	21,4	40,6	2,1
0,40–0,60	5,1	0,3	9,0	2,4	1,6	0,1	13,1	1,7	26,0	17,1	33,7	6,7

⁽¹⁾ Capacidade de troca de cátions a pH 7,0; ⁽²⁾ Carbono orgânico; ⁽³⁾ Saturação por bases;

⁽⁴⁾ Saturação por alumínio.

2.2 Condução e avaliação dos cultivos

No período experimental (maio de 2004 a abril 2017) foram conduzidos 26 cultivos, sendo 10 com a cultura da soja (*Glycine max* L.), três com milho (*Zea mays* L.), quatro com aveia branca (*Avena sativa* L.), três com trigo (*Triticum aestivum* L.), três com cevada (*Hordeum vulgare* L.) e três com nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). Deste total, 22 cultivos foram avaliados quanto à produtividade de grãos, excluindo-se, um cultivo com cevada (2007) devido à ocorrência de geada no estágio de florescimento e três cultivos de nabo forrageiro, os quais foram cultivados como planta de cobertura de solo antecedendo o milho no plano de rotação de culturas. O manejo fitossanitário realizado nos cultivos foi homogêneo para todos os tratamentos, seguindo as recomendações técnicas para as respectivas culturas. As informações referentes às cultivares/híbridos utilizados, densidades e espaçamentos na

semeadura, além das adubações praticadas são apresentadas na Tabela 3. As adubações foram realizadas tendo a ureia (45% de N) como fonte de N, o superfosfato triplo (42% de P) como fonte de P, e o cloreto de potássio (60% de K) como fonte de K.

Tabela 3. Informações agronômicas de todos os cultivos conduzidos na área experimental durante os anos de 2004 a 2017 em Guarapuava, PR.

Cultura/ano	Cultivar	Densidade de plantas (plants m ⁻²)	Espaçamento (m)	Adubação de semeadura (kg ha ⁻¹)			N cobertura (kg N ha ⁻¹)
				N	P	K	
Aveia (2004)	FAPA 4	250	0,17	–	–	–	30
Soja (2004/05)	BRS Macota	30	0,40	–	38	38	–
Nabo (2005)	–	120	0,17	–	–	–	–
Milho (2005/06)	P 30P34	7	0,80	39	78	78	150
Trigo (2006)	BRS Umbu	300	0,17	12	45	30	40
Soja (2006/07)	CD 215	30	0,40	–	48	48	–
Cevada (2007)	BRS Caue	300	0,17	20	75	50	40
Soja (2007/08)	CD 215	30	0,40	–	50	50	–
Aveia (2008)	FAPA 4	250	0,17	16	60	40	30
Soja (2008/09)	CD 215	30	0,40	–	60	60	–
Nabo (2009)	–	120	0,17	–	–	–	–
Milho (2009/10)	P 30R50	7	0,80	28	105	70	150
Trigo (2010)	BRS Guamirim	300	0,17	20	75	50	50
Soja (2010/11)	FPS Urano	35	0,40	–	50	50	–
Cevada (2011)	BRS Caue	280	0,17	28	105	70	40
Soja (2011/12)	FPS Urano	35	0,40	–	50	50	–
Aveia (2012)	URS Taura	250	0,17	8	30	20	36
Soja (2012/13)	ROOS Camino	35	0,40	–	50	50	–
Nabo (2013)	–	120	0,17	–	–	–	–
Milho (2013/14)	P 30F53YH	7	0,80	35	91	88	180
Trigo (2014)	BRS Campeiro	300	0,17	28	105	70	67
Soja (2014/15)	TMG 7262	25	0,40	–	50	50	–
Cevada (2015)	BRS Brau	280	0,17	24	90	60	45
Soja (2015/16)	TMG 7262	22	0,40	–	50	50	–
Aveia (2016)	URS Corona	250	0,17	–	–	–	45
Soja (2016/17)	Produza Ipro	22	0,40	–	–	–	–

Nos cultivos com soja (2004/2005, 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009), milho (2005), trigo (2006) e aveia branca (2004 e 2008) realizou-se amostragem de plantas ou folhas para diagnóstico do estado nutricional das plantas. As coletas foram realizadas quando as culturas atingiram o estágio de florescimento pleno. Para as culturas do trigo e aveia branca foram coletadas 20 plantas (parte aérea) para compor uma amostra composta, na soja coletou-se o primeiro trifólio plenamente desenvolvido e no milho a folha intermediária abaixo e oposta à espiga. As amostras foram secas, moídas e analisadas quanto aos teores de N, P, K, Ca, Mg e S segundo as metodologias descritas

em Malavolta (1997) e Tedesco et al. (1995).

A avaliação da produtividade de grãos foi realizada com colhedora mecanizada especializada para parcelas experimentais. A área útil avaliada foi de 32 m² (3,2 × 10 m) na cultura da soja, 16 m² (1,6 × 10 m) para milho e 34 m² (3,4 × 10 m) para os cereais de inverno. A produtividade de grãos foi expressa a 13% de umidade. Objetivando avaliar o efeito dos tratamentos no conjunto dos cultivos, calculou-se a produtividade acumulada de grãos da soja (10 cultivos), cereais (12 cultivos) e de todas as culturas (22 cultivos) para cada parcela (tratamento × repetição). Na sequência, calculou-se a produtividade relativa de grãos (% da produtividade máxima) de cada parcela para cada subgrupos (soja, cereais e todas as culturas) em relação a produtividade máxima acumulada da parcela, de acordo com a equação 2.

$$\text{Produtividade relativa (\%)} = \frac{\text{Produtividade de grãos acumulada da parcela}}{\text{Parcela com a maior produtividade acumulada}} \times 100 \quad \text{Eq.2}$$

2.3 Amostragem de solo

O solo da área foi amostrado após um ano (curto prazo) e 11 anos (longo prazo) da aplicação do calcário e do gesso agrícola. A amostragem foi realizada com trado calador, sendo coletadas oito subamostras para compor uma amostra composta por parcela. O solo foi amostrado em quatro camadas ao longo do perfil (*i.e.*, 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m). As amostras de solo foram secas a 55 °C em estufa com circulação de ar e analisadas, segundo metodologias descritas em Tedesco et al. (1995), em relação aos seguintes parâmetros: pH do solo em água (relação 1:1), teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ trocável extraídos por solução de KCl na concentração de 1,0 mol L⁻¹, teor de P disponível e K⁺ trocável extraído com Mehlich-1, teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo extraído por fosfato de cálcio em uma concentração de 0,01 mol L⁻¹, e índice SMP para estimar a acidez potencial (H+Al) (Kaminski et al., 2001). A partir da determinação desses atributos foi calculada a soma de bases (S), a capacidade de troca de cátions potencial [CTC_{pH 7.0} = (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + H+Al)], a saturação por bases [V (%) = (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺) / CTC_{pH 7.0} × 100] e a saturação por Al [m (%) = (Al³⁺ / Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Al³⁺) × 100].

2.4 Análise estatística

Os resultados foram inicialmente submetidos ao teste de normalidade (Shapiro Wilk, $p \leq 0,05$) para avaliação da homogeneidade de variância, quando os dados não apresentaram normalidade estes foram transformados para escala logarítmica. Na sequência, realizou-se a análise de variância (ANOVA, $p < 0,05$) dos resultados. Quando significativo, as médias dos atributos químicos do solo em função das diferentes estratégias de calagem e das doses de gesso foram comparados pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para os dados de produtividade de grãos e de teor de nutrientes no tecido vegetal em função das doses de gesso foram ajustadas equações de regressão polinomial ($p \leq 0,05$) e em função das estratégias de calagem submetidos ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A relação entre os teores de nutrientes no tecido vegetal e a produtividade das culturas foi avaliada por meio da correlação linear simples de Pearson ($p \leq 0,05$). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Statistical Analysis System (SAS) v. 9,3 (SAS Institute, Cary, NC, USA).

3. RESULTADOS

Não houve interação entre as estratégias de calagem e as doses de gesso quanto aos seus efeitos nos componentes da acidez do solo (Apêndice 2), produtividade de grãos (Apêndice 3) e para a maioria das concentrações de nutrientes na biomassa das culturas (Apêndice 4). Portanto, a apresentação e discussão dos resultados foram realizadas considerando-se os efeitos principais dos tratamentos de estratégias de calagem na média das doses de gesso, e dos tratamentos de gesso (doses) na média dos tratamentos de estratégias de calagem.

3.1 Componentes da acidez do solo em função da calagem

O uso do calcário de alto e baixo PRNT promoveu elevação do $\text{pH}_{(\text{água})}$ do solo e a redução dos teores de Al^{3+} trocável até a profundidade de 0,60 m (Figura 13a e 13c) em curto prazo (1 ano) após a aplicação. O calcário

de alto PRNT foi mais efetivo que o de baixo PRNT na redução da acidez em curto prazo em todo o perfil do solo, porém não houve diferença estatística entre as estratégias de calagem.

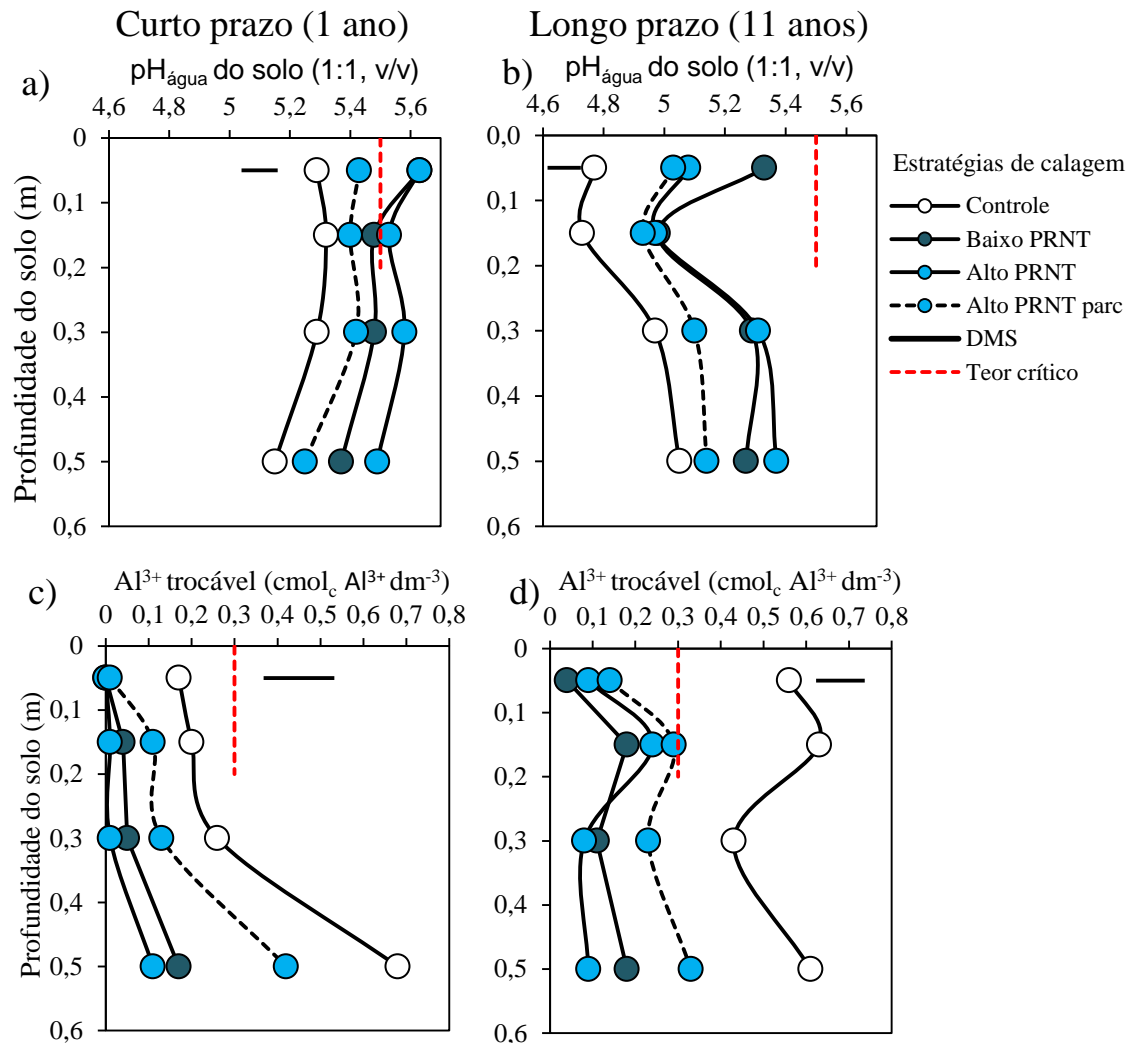


Figura 13. Valores de $\text{pH}_{\text{água}}$ (a, b) e teores de Al^{3+} trocável (c, d) em curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a calagem utilizando calcário de baixo (76%) e alto (101%) poder relativo de neutralização total (PRNT) aplicado em uma única vez ou parcelado (parc) em três aplicações anuais em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR. Linha sólida horizontal representa o valor de diferença mínima significativa (DMS) de Tukey para os tratamentos a 5% de significância. Linha pontilhada vermelha representa os teores críticos na camada de 0,00-0,20 m do solo para cultura de grãos: pH (água) = 5,5; Al^{3+} trocável = 0,3 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Pauletti & Motta, 2017).

A aplicação parcelada do calcário de alto PRNT teve efeito intermediário entre o tratamento controle (sem aplicação de calcário) e os demais tratamentos com calagem, pois esse tratamento havia recebido apenas

1/3 da dose de corretivo recomendada no momento da avaliação. No longo prazo (11 anos), observou-se maior persistência dos efeitos da calagem realizada com o calcário de baixo PRNT (Figura 13b), principalmente na camada superficial (0,00–0,10 m) onde o valor de $\text{pH}_{\text{água}}$ nesse tratamento foi 5% superior ao tratamento de calcário com alto PRNT ($\text{pH } 5,33 \times \text{pH } 5,08$). Nas demais camadas ao longo do perfil do solo não houve diferença entre os corretivos para o $\text{pH}_{\text{água}}$. O tratamento que recebeu aplicação parcelada do corretivo de alto PRNT foi menos eficiente que as demais estratégias de calagem em reduzir os teores de Al^{3+} trocável na camada de 0,40–0,60 m, porém o teor de Al^{3+} trocável deste tratamento foi 84% inferior ao tratamento controle (sem calagem) (Figura 13d).

A curto prazo após a calagem (1 ano), os teores de Ca^{2+} trocável aumentaram apenas na camada superficial do solo (0,00–0,10 m) (Figura 14a), na qual os tratamentos com calcário de alto e baixo PRNT incrementaram 15% em média os teores de Ca^{2+} trocável comparado ao tratamento sem aplicação de calcário. Já no longo prazo (11 anos), esse efeito foi mais intenso, estendendo-se até a camada de 0,10–0,20 m (Figura 14b) para o tratamento com calcário de baixo PRNT.

Por outro lado, os efeitos da calagem sobre os teores de Mg^{2+} trocável foram mais pronunciados em relação aos de Ca^{2+} trocável, com incrementos significativos até a camada mais profunda avaliada no estudo (*i.e.*, 0,40–0,60 m) logo após 1 ano da aplicação dos corretivos (Figura 14c). Na camada superficial a calagem incrementou em média 90% os teores de Mg^{2+} trocável em relação ao controle. Após 11 anos da aplicação dos corretivos, o uso do calcário de baixo PRNT manteve os teores de Mg^{2+} trocável em média 24% superiores aos tratamentos que receberam calcário de alto PRNT na camada de 0,00–0,40 m (Figura 14d).

Para ambos os corretivos (alto e baixo PRNT), verificou-se incremento significativo da V% em profundidade (até 0,60 m) logo após 1 ano da sua aplicação (Figura 14e). No longo prazo, o uso do calcário de baixo PRNT promoveu a manutenção de valores de V% acima dos limite crítico (V% > 65) na camada de 0,00–0,10 m enquanto que o corretivo de alto PRNT manteve em 56% e no controle a V% atingiu 39% (Figura 14f).

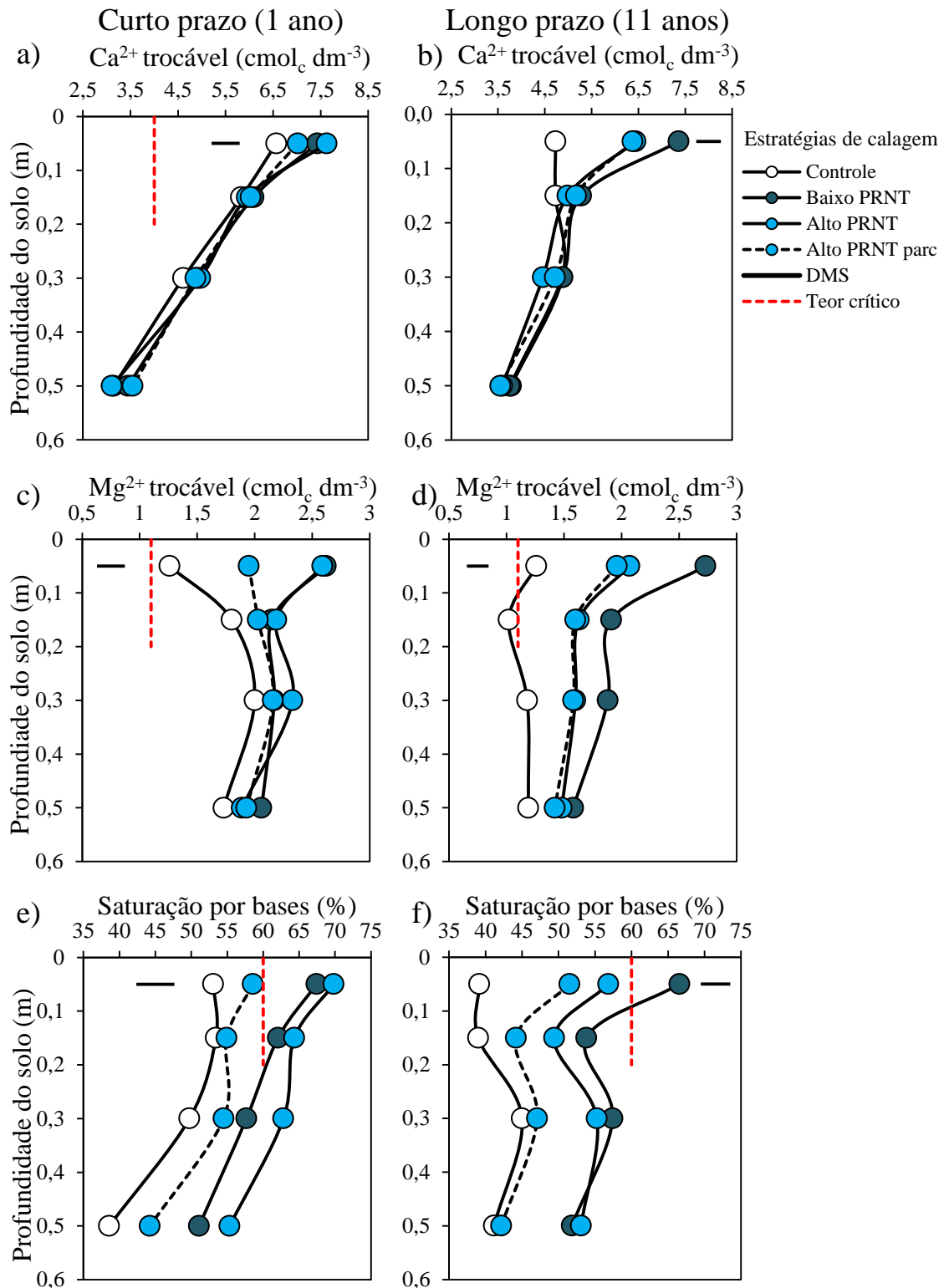


Figura 14. Teores de Ca^{2+} (a, b) e Mg^{2+} trocáveis (c, d) e de saturação por bases (e, f) em curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a calagem utilizando calcário com baixo (76%) e alto (101%) poder relativo de neutralização total (PRNT) aplicado em uma única vez ou parcelado (parc) em três aplicações anuais em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR. Linha sólida horizontal

representa o valor de diferença mínima significativa (DMS) de Tukey para os tratamentos a 5% de significância. Linha pontilhada vermelha representa os teores críticos na camada de 0,00-0,20 m do solo para cultura de grãos: Ca = 4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$; Mg = 1,1 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e saturação por bases = 60% (Pauletti & Motta, 2017).

3.2 Componentes da acidez do solo em função da aplicação de gesso agrícola

A aplicação de gesso teve efeito praticamente nulo sobre o $\text{pH}_{\text{água}}$ do solo, ocorrendo uma mínima redução (inferior a 4%) após transcorrido o primeiro ano da aplicação (Figura 15a). Esse efeito observado a curto prazo do gesso no $\text{pH}_{\text{água}}$ do solo não foi verificado após 11 anos da aplicação (Figura 15b). Adicionalmente, nenhuma alteração foi verificada nos teores de Al^{3+} trocável em função da aplicação do gesso (Figura 15c e 15d).

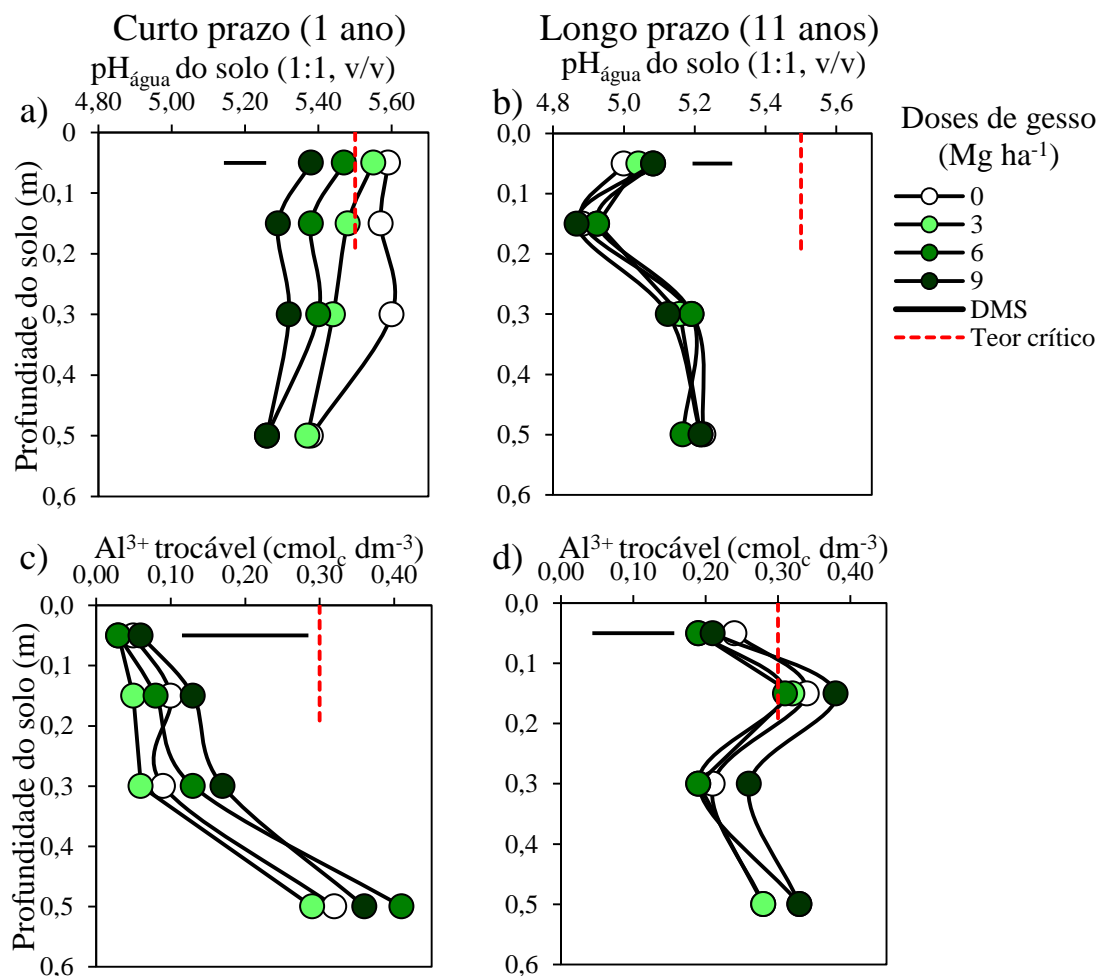


Figura 15. Valores de $\text{pH}_{\text{água}}$ (a, b) e teores de Al^{3+} trocável (c, d) em curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a aplicação de doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em

Guarapuava, PR. Linha sólida horizontal representa o valor de diferença mínima significativa (DMS) de Tukey para os tratamentos a 5% de significância. Linha pontilhada vermelha representa os teores críticos na camada de 0,00-0,20 m do solo para cultura de grãos: pH (água) = 5,5; Al^{3+} trocável = 0,3 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Pauletti & Motta, 2017).

Os teores de Ca^{2+} trocável ao longo do perfil do solo nos tratamentos que receberam gesso agrícola foram em média 23% superiores em relação ao tratamento controle (média = $5,6 \times 4,5 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$) (Figura 16a). Estes efeitos persistiram no longo prazo havendo diferença estatística (Figura 16b), embora a magnitude das diferenças entre os tratamentos tenha diminuído em comparação ao efeito de curto prazo.

Contrariamente ao que se observou para os teores de Ca^{2+} trocável, os teores de Mg^{2+} trocável no solo reduziram conforme aumentou a dose de gesso aplicada. No curto prazo, estes efeitos foram significativos até 0,20 m de profundidade (Figura 16c), aonde a dose de gesso de 9 Mg ha^{-1} reduziu em média 52% os teores de Mg^{2+} trocável em relação ao tratamento controle (sem gesso), de 2,71 para 1,29 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. No longo prazo, houve decréscimo nos teores de Mg^{2+} trocável do solo em todas as camadas abaixo de 0,10 m, evidenciando a lixiviação de Mg^{2+} trocável para camadas mais profundas que as avaliadas no presente estudo (*i.e.*, > 0,60 m) (Figura 16d).

Os efeitos observados nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis condicionaram a elevação da relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$ trocáveis na superfície do solo logo após a aplicação do gesso (Figura 16e), aumentando a relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$ de 2 no tratamento controle para 6,6 na maior dose de gesso avaliada (9 Mg ha^{-1}). Já no longo prazo, 11 anos após a aplicação do gesso, devido a maior lixiviação de Ca^{2+} trocável e solubilização de Mg^{2+} trocável oriundo dos corretivos, a relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$ trocáveis foi afetada de forma menos pronunciada e ocorreu principalmente nas camadas subsuperficiais (Figura 16f). Os teores de S-SO_4^{2-} disponível no solo foi avaliado somente após 11 anos da aplicação do gesso agrícola, apresentando incrementos significativos em seus teores em subsuperfície (> 0,20 m) com o aumento das doses de gesso (Figura 17).

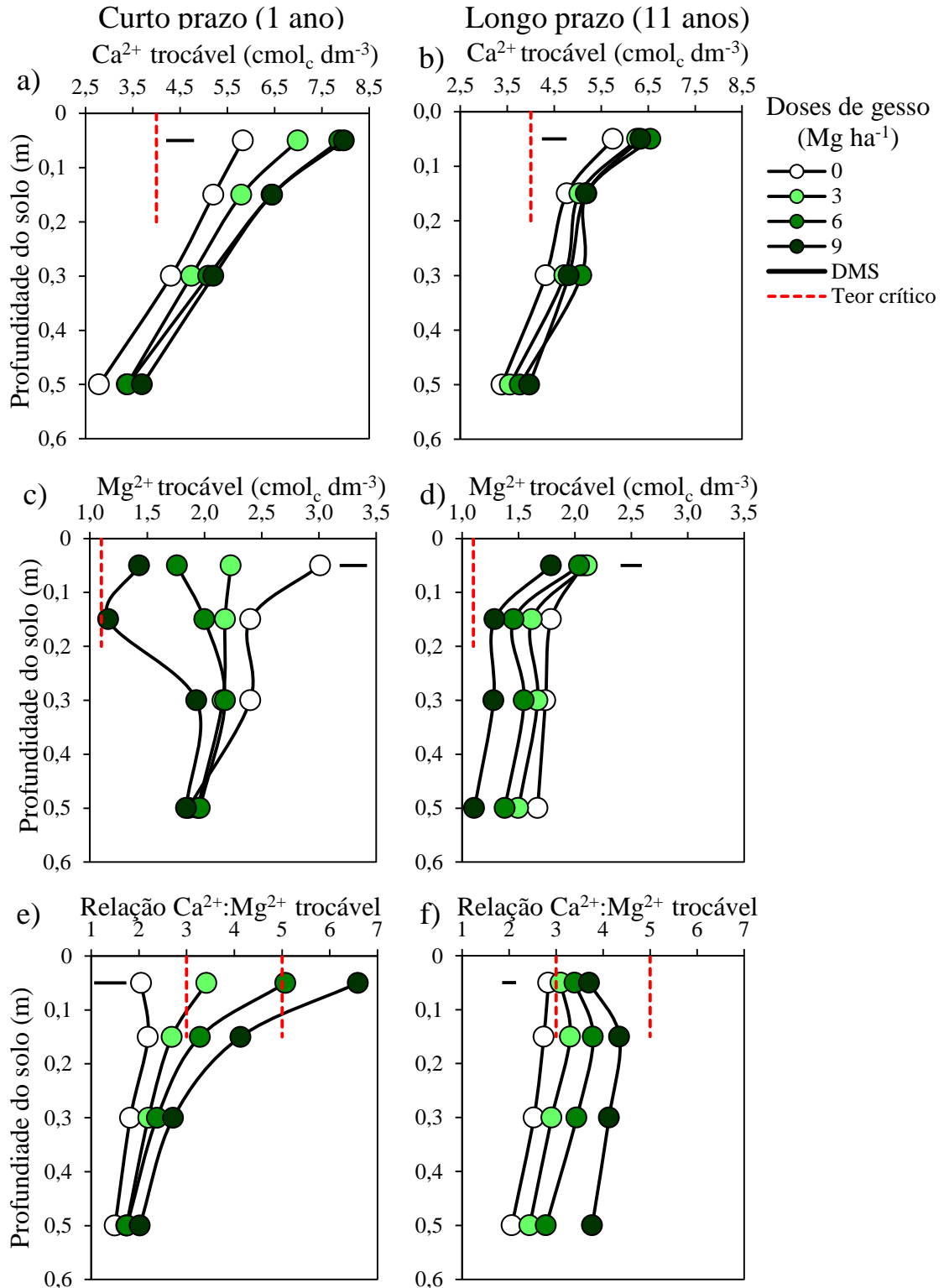


Figura 16. Teores de Ca²⁺ (a, b) e Mg²⁺ (c, d) trocáveis e relação Ca²⁺:Mg²⁺ trocáveis (e, f) em curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a aplicação de doses de gesso agrícola em um Latossolo conduzido em plantio direto em Guarapuava, PR. Linha sólida horizontal representa o valor de diferença mínima significativa (DMS) de Tukey para os tratamentos a 5% de significância. Linha pontilhada vermelha representa os teores críticos na camada de 0,00-0,20 m do solo para cultura de grãos: Ca²⁺ trocável = 4 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ trocável = 1,1 cmol_c dm⁻³ e relação Ca²⁺:Mg²⁺ trocáveis = 3-5 (Pauletti & Motta, 2017).

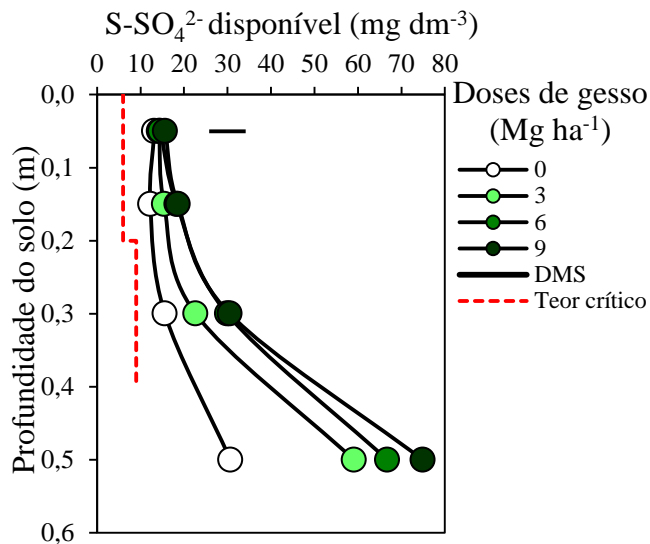


Figura 17. Teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo em longo prazo (11 anos) após a aplicação de doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR. Linha sólida horizontal representa o valor de diferença mínima significativa (DMS) de Tukey para os tratamentos a 5% de significância. Linha pontilhada vermelha representa os teores crítico de $S-SO_4^{2-}$ nas camadas de 0,00–0,20 e 0,20–0,40 m do solo para cultura de grãos que são de 6 e 9 $mg\ dm^{-3}$, respectivamente (Pauletti & Motta, 2017).

3.3 Teores de macronutrientes no tecido vegetal em função da aplicação de calcário e gesso agrícola

A calagem incrementou em média 15% os teores de N foliar da soja nas safras 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009 em relação ao tratamento controle, assim como, os teores de P foliar no cultivo de soja 2008/2009 e de aveia branca de 2008 (Tabela 4) foram incrementados em média 11%. Acréscimos nos teores de Mg foliar foram observados nos cultivos de aveia branca (2004 e 2008) e soja (2007/2008) nos tratamentos que receberam calcário de alto PRNT em relação aos tratamentos controles. Nos cultivos da soja 2004/2005, milho 2005/2006 e trigo 2006 a calagem não teve efeito nos teores dos macronutrientes (Apêndice 5).

A aplicação do gesso agrícola aumentou linearmente os teores de P no tecido vegetal da aveia branca 2004, onde a dose de 9 $Mg\ ha^{-1}$ aumentou em 12% os seus teores em relação ao tratamento controle (Figura 18a). Os teores de Mg no tecido vegetal da aveia 2004 e no teor foliar de três (2004/2005, 2007/2008 e 2008/2009) dos quatro cultivos de soja avaliados (Fi-

Tabela 4. Concentração de nutrientes (g kg^{-1}) foliar (média \pm desvio padrão) da aveia branca e soja em função da calagem superficial com calcário de baixo e alto poder relativo de neutralização total (PRNT) aplicados em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

Tratamentos	N		P		K		Ca		Mg		S	
-----Aveia branca (2004)-----												
Controle	11,21 \pm 1,10	ns	2,46 \pm 0,28	ns	19,77 \pm 1,96	ns	2,55 \pm 0,35	ns	1,15 \pm 0,15	b	1,27 \pm 0,42	ns
Baixo PRNT	10,32 \pm 0,68		2,37 \pm 0,21		18,88 \pm 1,15		2,88 \pm 0,50		1,23 \pm 0,10	ab	1,23 \pm 0,33	
Alto PRNT	10,18 \pm 0,79		2,44 \pm 0,17		17,83 \pm 2,56		2,86 \pm 0,34		1,34 \pm 0,17	a	1,41 \pm 0,49	
Alto PRNT, parc. ⁽¹⁾	11,22 \pm 1,03		2,41 \pm 0,19		19,50 \pm 1,91		2,71 \pm 0,23		1,13 \pm 0,12	b	1,38 \pm 0,42	
-----Soja (2006/2007)-----												
Controle	48,49 \pm 2,20	b	4,73 \pm 0,25	ns	26,42 \pm 3,28	ns	11,65 \pm 2,14	a	2,91 \pm 0,66	ns	2,65 \pm 0,16	ns
Baixo PRNT	54,55 \pm 1,68	a	4,84 \pm 0,28		23,43 \pm 4,69		9,86 \pm 1,97	ab	3,06 \pm 0,73		2,86 \pm 0,30	
Alto PRNT	53,03 \pm 1,97	a	4,73 \pm 0,27		24,71 \pm 4,33		10,13 \pm 0,76	ab	3,10 \pm 0,68		2,84 \pm 0,27	
Alto PRNT, parc.	53,65 \pm 1,34	a	4,88 \pm 0,25		28,35 \pm 3,92		9,12 \pm 0,58	b	3,20 \pm 0,46		2,89 \pm 0,19	
-----Soja (2007/2008)-----												
Controle	42,47 \pm 3,38	b	3,82 \pm 0,42	ns	26,53 \pm 1,62	ns	10,47 \pm 0,87	ns	3,35 \pm 0,21	b	2,89 \pm 0,54	ns
Baixo PRNT	52,09 \pm 1,94	a	4,56 \pm 0,43		25,12 \pm 1,87		9,71 \pm 1,72		3,46 \pm 0,28	b	3,18 \pm 0,32	
Alto PRNT	51,15 \pm 2,39	a	4,19 \pm 0,44		23,94 \pm 2,55		10,54 \pm 1,54		3,76 \pm 0,48	a	2,90 \pm 0,30	
Alto PRNT, parc.	51,53 \pm 1,81	a	4,22 \pm 0,32		26,24 \pm 1,70		9,90 \pm 0,97		3,51 \pm 0,17	ab	3,14 \pm 0,32	
-----Aveia branca (2008)-----												
Controle	10,24 \pm 0,69	ns	1,56 \pm 0,23	b	22,63 \pm 2,47	ns	2,54 \pm 0,21	ns	1,35 \pm 0,13	b	0,64 \pm 0,10	b
Baixo PRNT	10,67 \pm 0,79		1,73 \pm 0,21	ab	21,79 \pm 3,53		2,70 \pm 0,28		1,66 \pm 0,21	ab	0,68 \pm 0,09	ab
Alto PRNT	9,93 \pm 0,83		1,95 \pm 0,27	a	17,34 \pm 4,66		2,73 \pm 0,17		1,75 \pm 0,15	a	0,72 \pm 0,12	a
Alto PRNT, parc.	9,89 \pm 0,61		1,78 \pm 0,19	ab	21,88 \pm 2,63		2,71 \pm 0,21		1,64 \pm 0,24	ab	0,69 \pm 0,08	ab
-----Soja (2008/2009)-----												
Controle	44,76 \pm 2,27	b	3,54 \pm 0,29	b	24,99 \pm 2,10	a	8,82 \pm 1,00	ns	2,85 \pm 0,30	ns	2,56 \pm 0,19	ns
Baixo PRNT	50,67 \pm 1,93	a	3,72 \pm 0,28	a	23,95 \pm 2,03	ab	9,40 \pm 1,39		2,98 \pm 0,22		2,65 \pm 0,43	
Alto PRNT	49,50 \pm 1,64	a	3,61 \pm 0,25	ab	21,11 \pm 2,82	b	10,03 \pm 1,71		3,31 \pm 0,47		2,58 \pm 0,22	
Alto PRNT, parc.	50,17 \pm 1,66	a	3,76 \pm 0,25	a	25,11 \pm 2,22	a	9,21 \pm 1,34		2,96 \pm 0,28		2,79 \pm 0,18	

⁽¹⁾Dose de calcário foi dividida em três aplicações. *Médias seguidas pela mesma letra na coluna dentro de cada cultivo não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ns = não significativo.

gura 18b) reduziram linearmente com a aplicação das doses de gesso.

Os teores de Ca no tecido vegetal foram incrementados com a aplicação do gesso agrícola nos cultivos da aveia branca 2004, milho 2005/2006 e trigo 2006 (Figura 18c). Os cultivos de aveia branca 2004, milho 2005/2006 e soja 2007/2008 tiveram os seus teores de S no tecido vegetal incrementados em 117, 35 e 8%, respectivamente na maior dose de gesso aplicada (Figura 18d). Os demais macronutrientes (*i.e.*, N, K) não foram influenciados pela aplicação do gesso agrícola em nenhum dos cultivos avaliados (Apêndice 6).

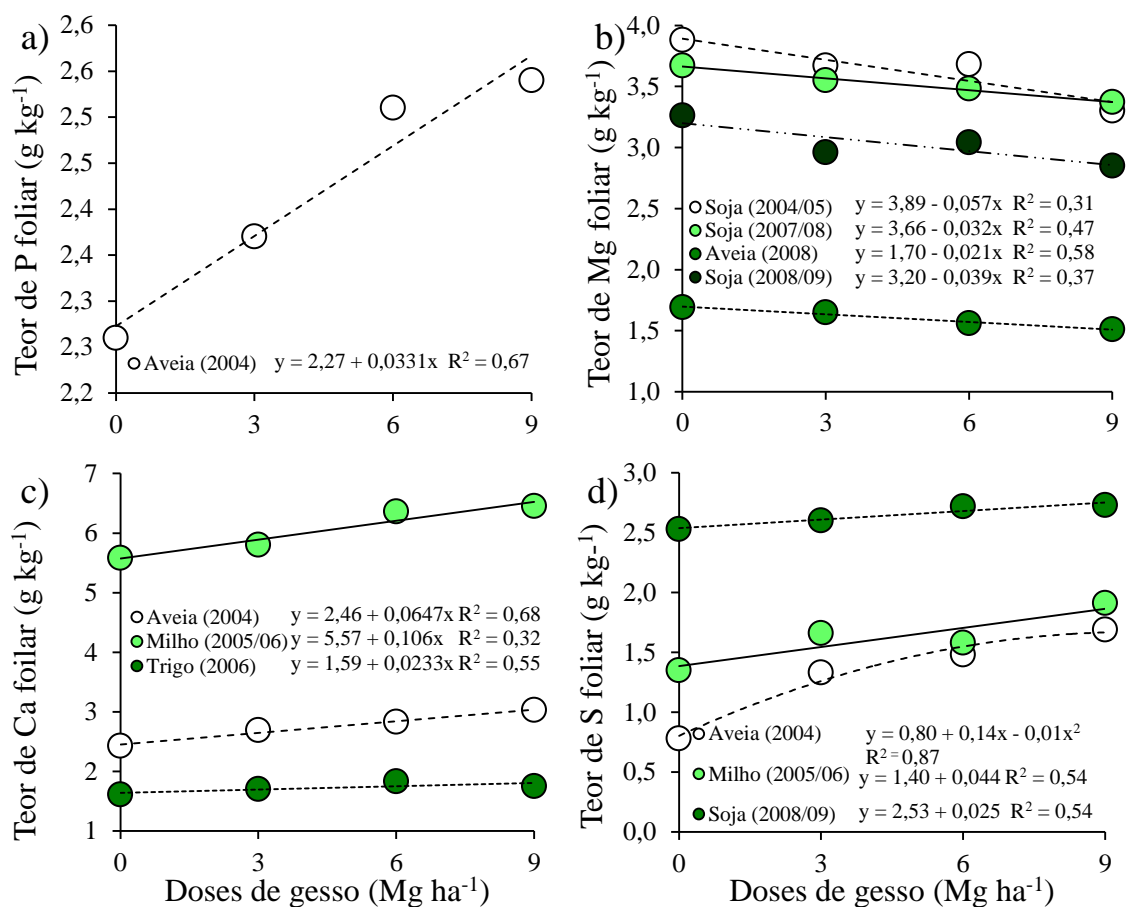


Figura 18. Teores médios de P (a), Ca (b), Mg (c) e S (d) foliar das culturas soja, milho, aveia branca e trigo em função da aplicação de doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

3.4 Produtividade de grãos das culturas em função da aplicação de calcário e gesso agrícola

Dos 22 cultivos avaliados, apenas seis responderam positivamente à calagem, sendo quatro desses com a cultura da soja (2006/2007, 2007/2008, 2008/2009 e 2012/2013), um com milho (2009/2010) e um com aveia branca (2012) (Tabela 5). O incremento médio de produtividade da soja com a calagem nos cultivos com resposta positiva foi de 14% ($0,38 \text{ Mg ha}^{-1}$). Já nos cereais os incrementos foram de apenas 1% para o cultivo de milho 2009/2010 ($0,14 \text{ Mg ha}^{-1}$) e de 9% ($0,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) para a aveia branca 2012 nos tratamentos que receberam calcário de baixo PRNT em relação aos tratamentos controles. Com exceção do cultivo da cevada 2011, em que o tratamento com calcário de alto PRNT apresentou menor produtividade de grãos que o de baixo PRNT (7%), nos demais cultivos não houve diferenças significativas de produtividade de grãos entre o uso de calcários com diferentes reatividades.

Tabela 5. Rendimento de grãos (média \pm desvio padrão, Mg ha^{-1}) em função da aplicação superficial de calcário com baixo e alto poder relativo de neutralização total (PRNT) aplicado em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

Cultura/ano	Estratégias de calagem				CV ⁽²⁾ (%)
	Controle	Baixo PRNT	Alto PRNT	Alto PRNT parc ⁽¹⁾	
Aveia (2004)	5,43 \pm 0,39 ns	5,09 \pm 0,39	4,71 \pm 0,28	5,30 \pm 0,68	11,21
Soja (2004/05)	2,70 \pm 0,25 ns	2,91 \pm 0,29	2,95 \pm 0,21	2,79 \pm 0,29	15,06
Milho (2005/06)	12,89 \pm 0,71 ns	12,29 \pm 0,72	12,21 \pm 0,84	12,97 \pm 1,05	7,84
Trigo (2006)	3,81 \pm 0,40 ns	3,68 \pm 0,28	4,03 \pm 0,56	3,75 \pm 0,23	11,54
Soja (2006/07)	3,66 \pm 0,13 b	3,91 \pm 0,09 ab	3,83 \pm 0,17 ab	3,98 \pm 0,11 a	3,89
Soja (2007/08)	2,25 \pm 0,17 b	2,74 \pm 0,14 a	2,66 \pm 0,18 ab	2,73 \pm 0,25 a	11,63
Aveia (2008)	5,44 \pm 0,50 ns	5,40 \pm 0,51	5,07 \pm 0,90	5,55 \pm 0,43	14,91
Soja (2008/09)	2,08 \pm 0,17 b	2,55 \pm 0,26 a	2,55 \pm 0,19 a	2,48 \pm 0,20 a	8,08
Milho (2009/10)	14,08 \pm 0,08 b	14,22 \pm 0,11 a	14,11 \pm 0,14 ab	14,17 \pm 0,12 ab	0,65
Trigo (2010)	5,08 \pm 0,34 ns	5,15 \pm 0,36	4,92 \pm 0,34	5,27 \pm 0,28	10,57
Soja (2010/11)	3,61 \pm 0,15 ns	3,76 \pm 0,14	3,78 \pm 0,14	3,70 \pm 0,14	3,41
Cevada (2011)	5,07 \pm 0,22 ab	5,17 \pm 0,17 a	4,85 \pm 0,24 b	5,12 \pm 0,18 ab	4,42
Soja (2011/12)	3,09 \pm 0,23 ns	3,30 \pm 0,15	3,31 \pm 0,26	3,21 \pm 0,14	8,58
Aveia (2012)	4,10 \pm 0,16 b	4,44 \pm 0,14 a	4,40 \pm 0,32 ab	4,29 \pm 0,14 ab	5,32
Soja (2012/13)	4,40 \pm 0,28 b	4,90 \pm 0,16 a	4,65 \pm 0,24 ab	4,79 \pm 0,30 ab	6,92
Milho (2013/14)	14,79 \pm 0,48 ns	14,94 \pm 0,46	14,42 \pm 0,58	14,90 \pm 1,14	5,28
Trigo (2014)	5,48 \pm 0,21 ns	5,66 \pm 0,22	5,56 \pm 0,24	5,58 \pm 0,14	4,04
Soja (2014/15)	4,39 \pm 0,25 ns	4,73 \pm 0,25	4,49 \pm 0,23	4,61 \pm 0,16	7,90
Cevada (2015)	4,12 \pm 0,10 ns	4,14 \pm 0,28	4,16 \pm 0,12	4,15 \pm 0,17	4,00
Soja (2015/16)	4,34 \pm 0,26 ns	4,37 \pm 0,37	4,01 \pm 0,32	4,36 \pm 0,26	12,80
Aveia (2016)	6,13 \pm 0,57 ns	6,18 \pm 0,71	6,06 \pm 0,49	6,24 \pm 0,66	10,10
Soja (2016/17)	3,85 \pm 0,32 ns	4,45 \pm 0,36	4,16 \pm 0,24	4,30 \pm 0,26	13,47

⁽¹⁾Quantidade total de calcário com PRNT de 101% parcelada em três aplicações. ⁽²⁾Coefficiente de variação. Médias seguidas por mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ns = não significativo.

A aplicação do gesso agrícola proporcionou pequenos incrementos na produtividade de grãos, e limitados a três dos 22 cultivos avaliados, sendo

dois com a cultura da aveia branca (2004 e 2012) (Figura 19a) e um com a cevada (2011) (Figura 19d) com incrementos médios de 4% na produtividade de grãos ($0,20 \text{ Mg ha}^{-1}$).

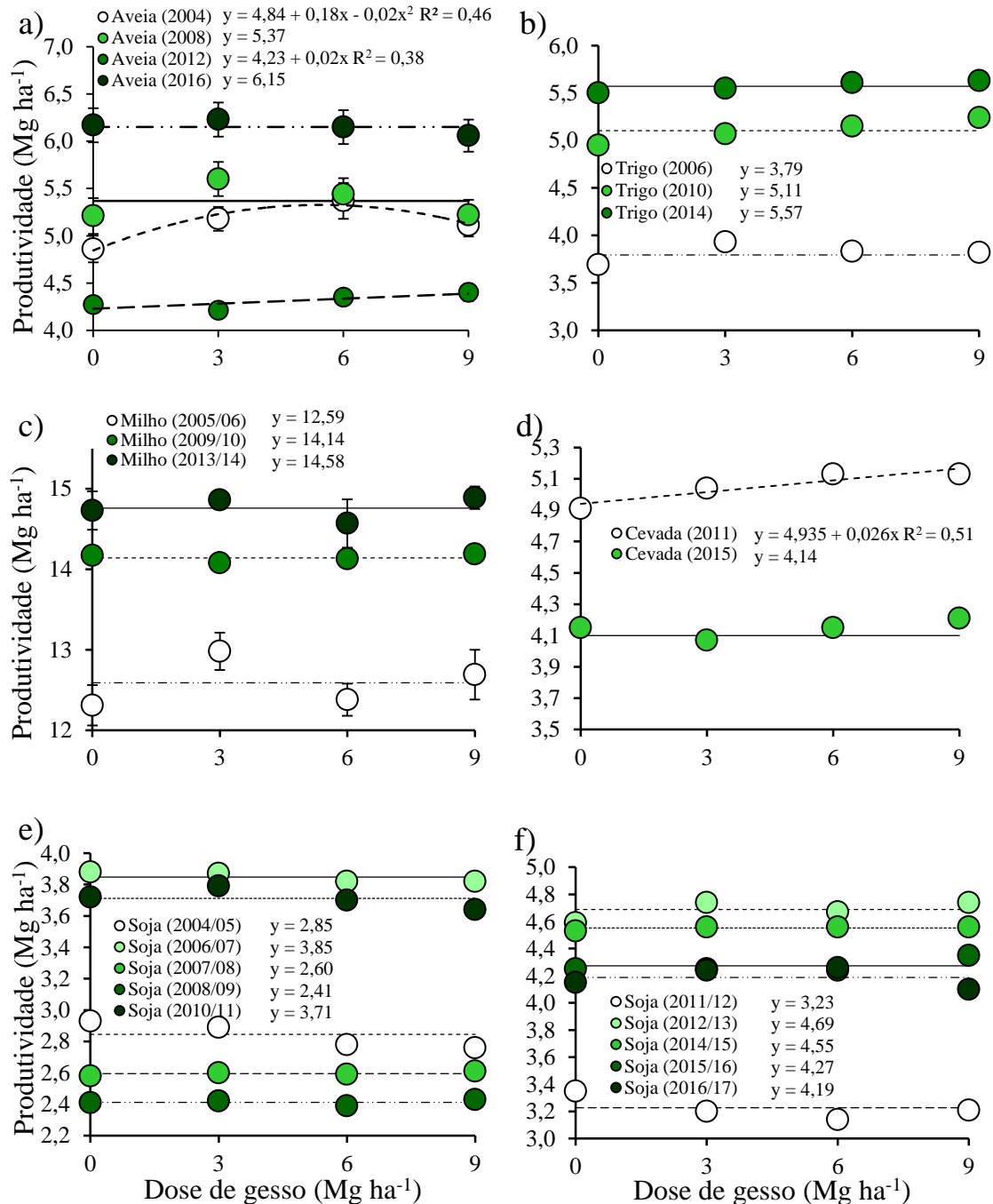


Figura 19. Produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) da aveia (a), trigo (b), milho (c), cevada (d) e soja (e, f) em função da aplicação de doses de gesso agrícola no ano de 2004 em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

A avaliação conjunta dos cultivos mostrou um comportamento diferenciado da soja em relação aos cereais frente à calagem (Figura 20a). A produtividade de grãos acumulada da soja (*i.e.*, 10 cultivos) no tratamento sem calcário foi de 88% da produtividade máxima, cerca de 9% inferior ao que foi obtido no tratamento com calcário de baixo PRNT (*i.e.*, 96% da produtividade máxima) (Figura 20a). Por sua vez, para os cereais (*i.e.*, 12 cultivos) e no somatório geral de todas as culturas (*i.e.*, 22 cultivos) a calagem não afetou a produtividade de grãos. Em relação à aplicação de gesso agrícola, não houve diferença significativa na produtividade de grãos acumulada dos cereais (milho, trigo e cevada), da soja e no conjunto de todas as culturas (Figura 20b).

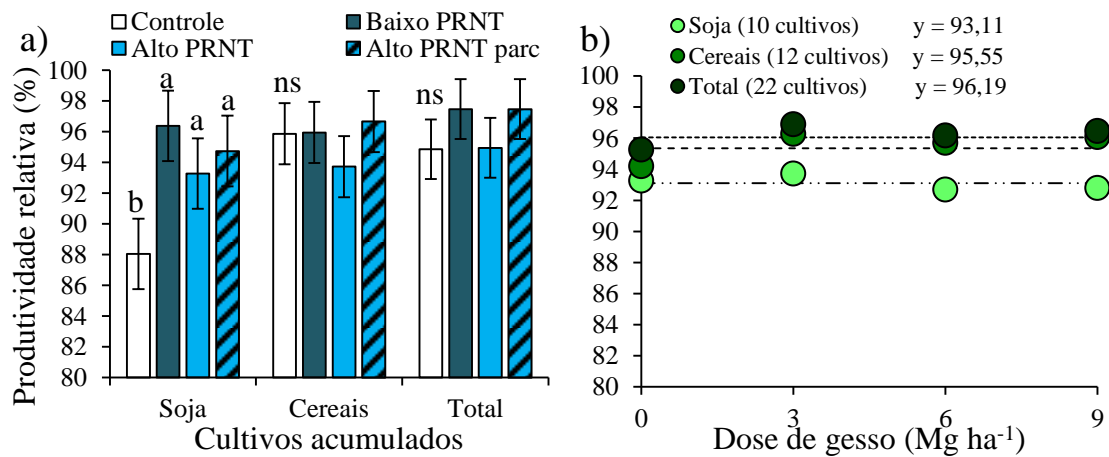


Figura 20. Produtividade relativa acumulada de grãos da cultura da soja (10 cultivos), cereais (12 cultivos) e do total de cultivos (22 cultivos) em função da realização de calagem com corretivos de alto e baixo poder relativo de neutralização total (PRNT) (a) e da aplicação de doses de gesso agrícola (b) em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Houve alta correlação positiva ($r = 0,66^{**}$) entre os teores de N foliar da cultura da soja (2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009) com a produtividade relativa de grãos, onde se observa que os menores teores de N foliar ocorridos no tratamento controle, resultaram em menor produtividade de grãos (Figura 21a). De maneira similar, os teores de P foliar foram correlacionados positivamente ($r = 0,65^{**}$) com a produtividade relativa da cultura da soja nos anos de 2006/2007 e 2007/2008 (Figura 21b). Ainda houve correlação positiva ($r = 0,31^{**}$) entre os teores de P (Figura 21c) e negativa ($r = -0,39^{**}$) dos teores de Mg (Figura 21d), no tecido vegetal da aveia branca (2004) com sua

produtividade de grãos, onde observa-se que a aplicação do gesso e calcário aumentaram a absorção de P e Mg pelas plantas, respectivamente. Para todos os demais cultivos não houve correlação entre a produtividade relativa de grãos e os teores de nutrientes foliares (Apêndice 7).

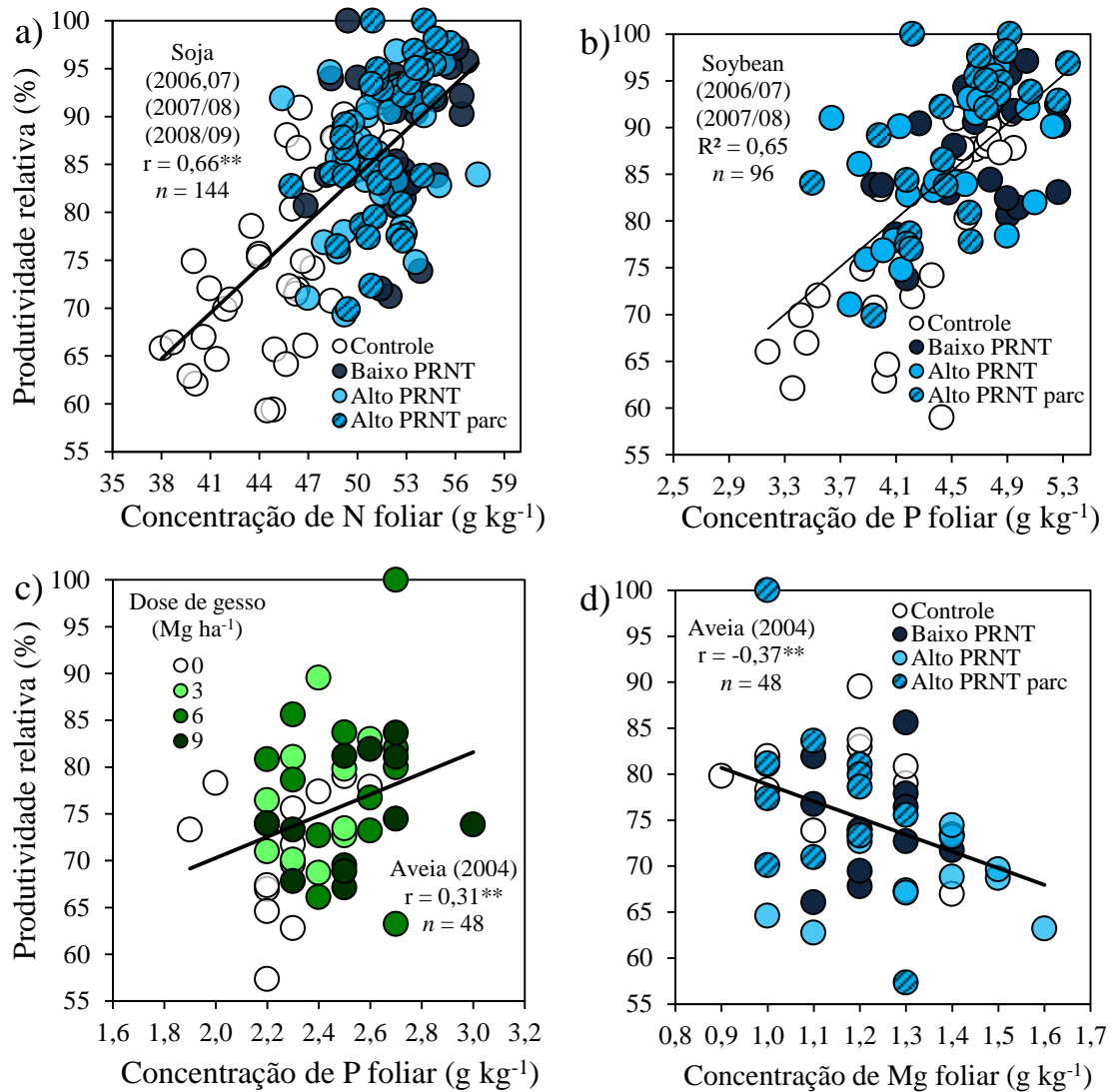


Figura 21. Correlação entre os teores de N foliar da cultura da soja (2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009) (a), P foliar da cultura da soja (2006/2007 e 2007/2008) (b), P (c) e Mg (d) foliar da aveia branca (2004) com a produtividade relativa de grãos dos respectivos cultivos em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR. * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$.

4 DISCUSSÃO

4.1 Calagem e a correção da acidez do solo

Vários estudos reportaram que a correção da acidez do solo em subsuperfície (*e.g.*, < 0,20 m) ocorre somente depois de vários anos da calagem (Rheinheimer et al., 2000; Caires et al., 2006; Calegari et al., 2013; Bortoluzzi et al., 2014; Martins et al., 2014; Pauletti et al., 2014; Joris et al., 2016). Entretanto, nossos resultados indicaram que após um ano da calagem já houve aumento significativo nos teores de Mg^{2+} trocável, $pH_{(água)}$, saturação por bases e redução da saturação por Al até 0,60 m de profundidade (Figuras 2 e 3).

Esse rápido efeito dos corretivos no perfil do solo sob SPD pode ser atribuído à descida de pequenas partículas de calcário através de biopóros que consistem em canais de raízes e da fauna, cuja presença é favorecida pela atividade biológica intensa (*i.e.*, bioturbação), adoção de sistema de rotação de culturas com plantas de diferente volume e arquitetura do sistema radicular e alto aporte de resíduos vegetais (Soratto & Crusciol, 2008; Tiritan et al., 2016). O alto volume de chuva na região (média anual = 1956 mm, Figura 12) também contribuiu à solubilização e percolação do corretivo no perfil do solo (Calegari et al., 2013; Dalla Nora et al., 2017b). A rápida movimentação do calcário no perfil do solo também foi verificada por Tiritan et al. (2016) em um Latossolo Tropical conduzido em sistema de integração lavoura-pecuária em SPD, aonde a calagem superficial reduziu a acidez até 0,30 m de profundidade após seis meses da aplicação. Por outro lado, Rheinheimer et al. (2000) e Joris et al. (2016) verificaram que a correção da acidez em profundidade foi limitada em áreas anteriormente ocupadas por pastagem degradada, com solo apresentando baixos teores de matéria orgânica, alta acidez e baixa qualidade estrutural. Dessa forma, pode-se inferir que a eficiência da calagem superficial na correção da subsuperfície do solo está associada ao histórico de uso e manejo das áreas em que o SPD é implantado (Calegari et al., 2013; Bortoluzzi et al. 2014).

O parcelamento da dose de calcário de alto PRNT reduziu o seu efeito em subsuperfície (> 0,20 m) principalmente para os teores de Al^{3+}

trocável, valores de $\text{pH}_{(\text{águas})}$ e saturação por bases em relação à aplicação da dose total (Figura 13 e 14). Se por um lado, um dos benefícios do parcelamento do corretivo é a redução das perdas de corretivo por escoamento superficial (Rheinheimer et al., 2018b), por outro lado, a profundidade de correção da acidez do solo depende da dose aplicada. Sendo assim, quanto mais alta a dose de corretivo aplicada mais profundo será o efeito da frente alcalinizante (Rheinheimer et al. 2000; Alvarez et al., 2007; Calegari et al., 2013; Rodrighero et al., 2015; Tiritan et al., 2016), sendo, portanto, mais vantajosa a aplicação da dose total ao invés do seu parcelamento em SPD, principalmente quando a acidez do solo não for muito alta.

É importante enfatizar o longo efeito residual da calagem observado no presente estudo, principalmente quando se utilizou calcário de baixo PRNT. Após 11 anos da aplicação do calcário de baixo PRNT, o solo apresentava valores de $\text{pH}_{(\text{águas})}$ próximos aos iniciais, porém manteve maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e saturação por bases $> 60\%$ (*i.e.*, 0,00–0,20 m) (Figura 14f), indicando que ainda não havia necessidade de uma nova calagem (Pauletti & Motta, 2017). Em solo com acidez moderada, como o do presente estudo, o tempo de reação do calcário pode ser prolongado, pois a solubilização do calcário depende de meio ácido e de baixos teores de Ca^{2+} trocável (Zoca & Penn, 2017). Sendo assim, a reação mais lenta do calcário no solo, pode justificar o efeito inicial mais lento e um efeito residual mais prolongado (Joris et al., 2016). Corroborando com estudo prévio (Gonçalves et al., 2011) o efeito residual nos atributos do solo foram mais pronunciados quando da aplicação de calcário menos reativo (*i.e.*, menor PRNT) em relação ao de maior reatividade. A aplicação total ou parcelada do calcário de alto PRNT, resultou após 11 anos em valores de $\text{pH}_{(\text{águas})}$, teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis similares a aqueles medidos antes da calagem e valores de saturação por bases de 55 e 48%, respectivamente, justificando, portanto a realização de uma nova calagem ($V\% < 60\%$, Pauletti & Motta, 2017).

De maneira geral, nossos resultados mostraram que o processo de reacidificação do solo sob SPD é lento e, portanto, menos dependente do uso de insumos externos, 11 anos após a aplicação de calcário de baixo e alto PRNT houve recuperação em média de 67% e 89% da acidez inicial (*i.e.*, H+Al) ao longo do perfil do solo (*i.e.*, 0,00–0,60 m), respectivamente. Rheinheimer et

al. (2018) verificaram em um Argissolo arenoso que 24 anos após aplicação de calcário apenas 20% da acidez original havia sido reestabelecida. A diferença entre nossos resultados e dos autores citados acima está ligada principalmente à alta acidez inicial da área por eles estudada (e.g., saturação por bases < 10%), o que resultou na aplicação de alta dose de calcário.

4.2 Gessagem e os componentes da acidez do solo

A pequena redução no $\text{pH}_{(\text{água})}$ do solo observada no curto prazo devido à aplicação de gesso (Figura 15a) pode estar associado ao deslocamento de Al^{3+} trocável e H^+ adsorvido ao solo pelo Ca^{2+} trocável adicionado via gesso (Zoca & Penn, 2017). A hidrólise de cada Al^{3+} trocável deslocado para a solução do solo gera 3 íons H^+ ($\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$) resultando na redução do $\text{pH}_{(\text{água})}$ do solo. Pequenos aumentos no $\text{pH}_{(\text{água})}$ do solo devido à aplicação de gesso também tem sido reportados na literatura (Crusciol et al., 2016; Costa & Crusciol, 2016) e ocorrem possivelmente devido às reações de troca entre íons OH^- e S-SO_4^{2-} . No entanto, é amplamente reconhecido que o gesso não tem efeito corretivo da acidez do solo, pois não produz OH^- e nem consome H^+ em sua dissociação (Zoca & Penn, 2017).

O gesso agrícola é reconhecido como sendo eficiente em reduzir os níveis de Al^{3+} trocável nos solo (Caires et al., 2016; Costa & Crusciol, 2016). Isso pode ocorrer por vários mecanismos como (i) lixiviação do Al^{3+} trocável como par iônico com o S-SO_4^{2-} e, (ii) pela formação de precipitados como o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e (iii) formação de complexos como AlSO_4^+ o qual apresenta menor toxicidade para as plantas (Zambrosi et al., 2007; Fageria & Nascente, 2014; Costa & Crusciol, 2016; Zoca & Penn, 2017). No entanto, em nosso estudo os teores de Al^{3+} trocável não foram influenciados pela aplicação do gesso agrícola, o que se deve possivelmente aos baixos teores presentes no solo estudado (Figura 16c e 16d).

Além da sua capacidade de amenizar os efeitos da acidez do solo, o gesso agrícola constitui-se numa importante fonte de Ca^{2+} trocável e de S-SO_4^{2-} disponível para o solo, aumentando a disponibilidade destes nutrientes às plantas (Figura 15a, 15b e 16e) (Crusciol et al., 2016; Costa & Crusciol, 2016; Dalla Nora et al., 2017b). No entanto, o S-SO_4^{2-} parcialmente hidrolisado

é altamente móvel no solo e pode ligar-se com cátions acompanhantes, como o Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} trocáveis, podendo causar deficiências nutricionais em caso de lixiviação excessiva de K^+ e Mg^{2+} trocáveis (Pauletti et al., 2014), o que explica a redução dos teores de Mg^{2+} trocável que ocorreu até a profundidade de 0,40 m no primeiro ano e até a camada mais profunda avaliada (*i.e.*, 0,40–0,60 m) em longo prazo (11 anos) após a aplicação. No presente estudo não houve diferenças significativas (dados não apresentados) no teor de K^+ trocável do solo entre os tratamentos, assim como observado em estudo prévio (Pauletti et al., 2014). A maior facilidade de lixiviação de Mg^{2+} trocável pela aplicação do gesso em relação ao K^+ trocável se deve à preferência dos íons de $S-SO_4^{2-}$ em fazer ligação com o Mg^{2+} trocável devido a sua maior energia de ligação (Zocca & Penn, 2017).

O gesso agrícola tem sido preconizado para áreas que apresentam altos teores de Al^{3+} trocável e baixos teores de Ca^{2+} trocável em subsuperfície (0,20–0,40 m). Nesses casos, a sua aplicação aumenta a quantidade de Ca^{2+} trocável em subsuperfície e, conseqüentemente, reduz a atividade do Al^{3+} trocável, resultando em aumento de V% do solo (Costa & Crusciol, 2016; Dalla Nora et al., 2017b). No presente estudo, os teores iniciais de Al^{3+} trocável em subsuperfície eram baixos (*i.e.*, $0,12 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e os teores de Ca^{2+} trocável altos ($3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Tabela 2). Dessa forma, consistente com resultados reportado por Crusciol et al. (2016) a aplicação do gesso não afetou a V% (Apêndice 8c e 8d), pois ocorreu uma compensação entre o aumento dos teores de Ca^{2+} trocável e a redução dos teores de Mg^{2+} trocável.

O gesso agrícola proporcionou um rápido aumento (1 ano) nos teores de Ca^{2+} trocável do solo em todas as camadas avaliadas (Figura 16a). Dalla Nora et al. (2017b) observaram diferenças significativas dos teores de Ca^{2+} trocável e de $S-SO_4^{2-}$ disponível de um Latossolo após apenas seis meses da aplicação do gesso. O efeito residual do gesso agrícola no incremento dos teores de Ca^{2+} trocável e de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo a longo prazo esta bem documentado na literatura (Caires et al., 2011a; Costa & Crusciol, 2016; Dalla Nora et al., 2017b). Contudo, no presente estudo as alterações nos teores de Ca^{2+} trocável foram pouco expressivas em longo prazo (11 anos) após a aplicação do gesso e limitada à apenas a camada superficial (Figura 16b). A determinação do efeito residual do gesso agrícola é fundamental, pois permite

diluir o custo do produto ao longo de várias safras, aumentando a viabilidade econômica desta prática de manejo (Dalla Nora et al., 2017b). Nossos resultados mostraram que os benefícios do gesso na redução dos efeitos indesejados da acidez do solo perduram por tempo inferior a 11 anos, mesmo ele sendo aplicado em altas doses (*i.e.*, 9 Mg ha⁻¹).

A aplicação do gesso em curto prazo incrementou os teores de Ca²⁺ trocável na camada superficial (0,00–0,10 m) do solo em 38% em relação ao tratamento sem aplicação de gesso (Figura 16a), enquanto a calagem incrementou os teores de Ca²⁺ trocável em apenas 16% (*i.e.*, alto PRNT) em relação ao tratamento sem calagem (Figura 14a). Esse resultado evidencia o efeito mais rápido do gesso agrícola na disponibilização de Ca²⁺ trocável, o que provavelmente se deve à sua maior solubilidade em relação ao calcário (Bennett et al., 2014; Crusciol et al., 2016; Pauletti et al., 2014). Já no longo prazo, os tratamentos que receberam gesso agrícola permaneceram com teores médios de Ca²⁺ trocável 14% superiores ao tratamento sem aplicação de gesso (Figura 16b), enquanto no tratamento com calagem de baixo PRNT o teor de Ca²⁺ trocável foi 56% superior ao tratamento sem calagem (Figura 14b). Dessa forma, evidencia-se um efeito residual muito superior da calagem em relação à gessagem, corroborando estudos anteriores (Costa & Crusciol, 2016; Crusciol et al., 2016). O tempo de reatividade do calcário é inversamente relacionado ao seu efeito residual (Gonçalves et al., 2011). Esses resultados demonstram que o uso do gesso aliado ao calcário de baixo PRNT pode ser uma boa alternativa para corrigir solos com elevada acidez.

4.3 Atributos químicos do solo, teores de nutrientes no tecido vegetal e produtividade das culturas em função de diferentes estratégias de calagem

Não foi confirmada a hipótese de que num solo com acidez moderada ao longo do perfil a aplicação concomitante de gesso agrícola e de calcário promoveria um efeito sinérgico no solo, resultando em aumento na produtividade das culturas. Tal sinergismo tem sido amplamente reportado na literatura para solos com alta acidez subsuperficial (Crusciol et al., 2016; Costa & Crusciol, 2016; Dalla Nora et al., 2017a; 2017b).

Os teores foliares de P na cultura da soja aumentaram com a calagem (Tabela 4), mesmo sem haver incremento na disponibilidade de P disponível no solo (Apêndice 9a e 9b). De fato, o tratamento controle apresentou valores superiores de disponibilidade P na camada superficial em relação aos tratamentos com calagem. Esse resultado pode estar relacionado com a menor produtividade das culturas obtida no tratamento controle, reduzindo, conseqüentemente, as exportações de nutrientes. Culturas com maior produtividade extraem maiores quantidades de nutrientes do solo, mas por outro lado, produzem maiores quantidades de biomassa o que incrementa a ciclagem de nutrientes e reduz a lixiviação, especialmente de nutrientes com alta mobilidade no solo (NO_3^-). Além disso, deve-se considerar que a correção da acidez pela calagem pode ter favorecido o crescimento do sistema radicular da cultura, aumentando assim, o volume de solo explorado pela planta e sua capacidade de absorção de água e nutrientes, especialmente aqueles pouco móveis no solo, como o P (Holland et al., 2018).

A calagem também promoveu aumento do teor foliar de N na cultura da soja (Tabela 4). O aumento do $\text{pH}_{(\text{água})}$ do solo pode afetar positivamente a eficiência da fixação biológica de N, o que justifica os maiores teores de N foliar nos tratamentos que receberam calagem (Costa & Crusciol, 2016; Fageria & Nascente et al., 2014). Segundo Miransari (2016), a condição de $\text{pH}_{(\text{água})}$ do solo abaixo de 5,5 reduz significativamente a fixação biológica de N na soja, pois influencia na sobrevivência e crescimento do *Rizhobium*, infecção, nodulação e fixação do N. Valores de $\text{pH}_{(\text{água})} > 5,5$ foram observados no primeiro ano de estudo apenas nos tratamentos que receberam calcário de baixo e alto PRNT em aplicação total. No longo prazo, todos os tratamentos apresentavam $\text{pH}_{(\text{água})} < 5,5$, porém o tratamento com calcário de baixo PRNT manteve o valor do $\text{pH}_{(\text{água})}$ em 5,3, próximo do ideal para uma eficiente fixação biológica de N (Figura 13b). Nos cultivos de soja em que foram observados aumentos significativos dos teores N e P foliar houve também respostas em produtividade de grãos (Tabelas 3 e 4). Estes resultados sugerem uma relação de causa-efeito entre as variáveis, confirmada pela alta correlação entre os teores de N ($r = 0,66^{**}$) e P ($r = 0,65^{**}$) com a produtividade relativa da cultura da soja (Figura 21a, 21b). Dessa forma, observou-se efeito positivo da calagem

em 40% dos cultivos de soja, havendo incremento médio na produtividade de grãos de 14% ($0,38 \text{ Mg ha}^{-1}$, Tabela 5).

Apesar dos benefícios da calagem nas propriedades químicas do solo (e.g., aumento do $\text{pH}_{(\text{água})}$, teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis, saturação por bases e redução do Al^{3+} trocável) a produtividade de grãos do milho e dos cereais de inverno foram pouco influenciadas, sendo que menos de 20% dos cultivos apresentaram resposta positiva, com incremento médio de apenas 5%. Dessa forma, nossos resultados corroboram com os observados por Joris et al. (2016) em que observaram que a cultura da soja apresenta maior sensibilidade à acidez em comparação com os cereais. Altas produtividades de grãos de culturas conduzidas em SPD têm sido frequentemente reportadas na literatura mesmo em solos com alta acidez (Martins et al., 2014; Joris et al., 2016). No presente estudo, o tratamento controle (ausência de calagem) obteve produtividade média de $3,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ para soja, $13,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ para milho e $4,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ para os cereais de inverno o que corresponde a uma produtividade superior em 5, 65 e 70%, respectivamente, da produtividade média dos últimos cinco anos (2011–2016) no estado do Paraná, Brasil (CONAB, 2017). Baseado nisso, sugere-se que a maior ciclagem de nutrientes e o maior poder tampão do solo sob SPD em relação ao preparo convencional, proporcionam melhores condições para o crescimento das plantas mesmo em $\text{pH}_{(\text{água})}$ mais baixos, reduzindo a dependência por fertilizantes e corretivos e, conseqüentemente, aumentando a sustentabilidade do sistema produtivo (Martins et al., 2014; Joris et al., 2016).

A ausência de resposta à calagem na maioria dos cultivos ($\approx 70\%$) pode também ser interpretada a partir das condições químicas do solo no tratamento controle aos 11 anos após o início do experimento. No tratamento controle, mesmo com o $\text{pH}_{(\text{água})}$ do solo na camada de 0,00–0,20 m tendo sido classificado como baixo (i.e., 4,75), o teor de Al^{3+} trocável do solo não aumentou demasiadamente, permanecendo na classe baixa ($0,3\text{--}0,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Figura 13b e 13d), assim como, o solo apresentava teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis considerados ideais para o desenvolvimento das cultura (Ca^{2+} trocável $> 2,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e Mg^{2+} trocável $> 1,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, Figura 14e e 14d), segundo critérios diagnósticos preconizados pela comunidade científica (Pauletti & Motta, 2017). Por fim, o solo da área do estudo apresentava altos

teores de matéria orgânica, sendo de 5,6 e 4,2% em média na camada de 0,00–0,20 m 1 e 11 anos após a aplicação dos tratamentos, respectivamente.

O correto manejo do solo em SPD normalmente promove acúmulo de matéria orgânica no solo (Cherubin et al., 2018), a qual exerce múltiplas funções que garantem o funcionamento do solo e sustentam a produtividade dos cultivos mesmo em solos ácidos, tanto pelo aumento da disponibilidade de nutrientes quanto pela redução da toxicidade do Al^{3+} trocável (Martins et al., 2014; Rheinheimer et al., 2018b). Além disso, a decomposição de restos culturais libera ácidos orgânicos, que assim como outros componentes exsudados pelas raízes das plantas são capazes de formar complexos organometálicos com o Al^{3+} trocável e, conseqüentemente, reduzem a toxicidade do Al^{3+} trocável para o desenvolvimento radicular das plantas (Alleoni et al., 2010; Martins et al., 2014; Holland et al., 2018). Mesmo em um solo extremamente ácido (saturação por bases = 10%, camada de 0,00–0,20 m), Joris et al. (2016) não observaram influência da calagem na produção de massa seca da aveia preta. Da mesma maneira, Martins et al. (2014) em um Latossolo com moderada acidez superficial (saturação por bases = 40%, camada de 0,00–0,20 m) e alta acidez subsuperficial (saturação por Al = 60%, camada 0,20–0,40 m), não observaram resposta da soja à realização da calagem em nenhum dos três cultivos avaliados.

Na avaliação da produção acumulada dos cultivos de soja, o tratamento controle produziu aproximadamente 9% ($3,25 \text{ Mg ha}^{-1}$) menos grãos que o tratamento com calcário de baixo PRNT (Figura 20a). Entre as estratégias de calagem não houve diferenças na produtividade de grãos, corroborando os resultados prévios observado por Rodrighero et al. (2015) avaliando calcário com diferentes reatividades em solos de textura arenosa e argilosa. Contudo, devido ao maior efeito residual da correção da acidez proporcionada pelo calcário de baixo PRNT, corretivo com estas características deve ser preconizado visando aumentar o tempo de retorno da calagem e conseqüentemente, aumentar a lucratividade da lavoura. A produção acumulada dos cereais e a produção total de grãos não foi alterada pela calagem. Contudo, a calagem afetou significativamente a soja, principal cultura dos sistemas de rotação em áreas de SPD no Brasil (CONAB, 2017) e de alto retorno econômico aos produtores. Por este motivo o monitoramento da acidez

do solo e a realização da calagem deve ser sempre recomendada objetivando-se assegurar um adequado ambiente para o desenvolvimento das culturas e para obtenção de alta produtividade de grãos.

4.4. Atributos químicos do solo, teores de nutrientes no tecido vegetal e produtividade das culturas em função de diferentes doses de gesso agrícola

O aumento da disponibilidade de Ca^{2+} trocável (Figura 16a) e S-SO_4^{2-} disponível (Figuras 17) do solo até 0,60 m de profundidade e de P disponível na camada superficial (Apêndice 8a), devido à aplicação de gesso agrícola resultaram em incremento destes nutrientes no tecido vegetal da aveia branca 2004 (Figura 18a, 18c) e em incremento de aproximadamente 8% na produtividade de grãos (Figura 19a). O aumento da produtividade de grãos da aveia branca 2004 foi positivamente correlacionado ($r = 0,31^{**}$) com o teor de P no tecido vegetal (Figura 21c). Esse resultado possivelmente está atrelado à ausência de adubação na cultura da aveia branca 2004, onde as plantas cultivadas no tratamento controle dependeram unicamente dos teores de P disponível no solo, enquanto nos tratamentos que receberam gesso este contribuiu para aumento da disponibilidade do P (e.g., concentração de P no gesso $\approx 1\%$). O aumento dos teores de S foliar com a aplicação de gesso, conforme detectado para os cultivos aveia branca (2004), milho (2005) e soja (2008/2009) tem sido frequentemente reportado na literatura (Tiecher et al., 2013; Crusciol et al., 2016). Porém, assim como verificado no presente estudo, estes incrementos nem sempre refletem em aumento da produtividade das culturas (Figura 19), caracterizando-se na maioria dos casos, como “absorção de luxo” de S pelas plantas.

Estudos prévios indicaram que os cereais são mais responsivos ao gesso agrícola em relação à soja (e.g., Dalla Nora et al., 2017a; Tiecher et al., 2018). Nossos resultados corroboram esses estudos, pois a resposta positiva ao gesso agrícola ocorreu em 25% dos cultivos com cereais, enquanto a soja não aumentou a produtividade em nenhum cultivo. Contudo, mesmo nos cereais que apresentaram respostas positivas o incremento médio de produtividade foi de apenas 4% (Figura 19a e 19d). A maior resposta dos

cereais ao gesso agrícola em relação à soja tem sido atrelada principalmente ao aumento da eficiência do uso do N (Caires et al., 2016), o qual é um nutriente bastante dinâmico no solo, sendo facilmente lixiviado na forma de nitrato para camadas subsuperficiais, tornando-se inacessível às plantas.

O uso do gesso agrícola resultou em redução dos teores de Mg^{2+} trocável (Figura 16c e 16d) e aumento da relação $Ca^{2+}:Mg^{2+}$ trocáveis (Figura 16e e 16f) em todas as camadas do solo avaliadas. Contudo, os teores de Mg^{2+} trocável no solo mantiveram-se acima do teor crítico ($1,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) considerado para o desenvolvimento satisfatório das culturas de grãos (Pauletti & Motta, 2017), tanto a curto quanto a longo prazo. Já a relação $Ca^{2+}:Mg^{2+}$ trocáveis a curto prazo apresentou valor acima de 6,5 na camada superficial, valor esse superior ao considerado ideal para as culturas (3-5) (Pauletti & Motta, 2017). A redução do teor de Mg^{2+} trocável no solo refletiu na redução dos teores de Mg foliar da soja em três cultivos (2004/05, 2007/08 e 2008/09) e da aveia branca 2004. Porém, para ambas as culturas, os teores do nutriente permaneceram dentro ou próximos das faixas consideradas ideais. Sendo assim, a aplicação do gesso não impactou negativamente na produtividade de grãos.

Em solos subtropicais com alta acidez subsuperficial (saturação por Al >10%) os incrementos em produtividade de grãos em SPD pela aplicação de gesso agrícola tem sido em média de 17% e ocorrem principalmente para os cereais (82% dos cultivos) e para soja quando da presença de déficit hídrico (100%) (Tiecher et al., 2018). De fato, a resposta das culturas à aplicação de gesso é maior em anos com deficiência hídrica (Dalla Nora et al., 2017a; Tiecher et al., 2018) devido a redução da atividade do Al^{3+} trocável e do aumento da concentração de cátions básicos no subsolo. Nessas condições as plantas normalmente apresentam um melhor e mais profundo desenvolvimento do sistema radicular (Dalla Nora & Amado, 2013; Caires et al., 2016), permitindo absorver água e nutrientes de camadas antes inacessíveis. Em nosso estudo, observamos a ocorrência de alguma deficiência hídrica em pelo menos cinco cultivos (soja 2004/05, 2008/09, 2016/17, trigo 2010 e aveia branca 2012, Figura 12), mas somente a aveia branca 2004 apresentou aumento de 3% no rendimento de grãos na maior dose de gesso testada.

Nossa hipótese de que pudesse haver aumento da produtividade das culturas devido ao aumento dos teores de Ca^{2+} trocável e de S-SO_4^{2-} disponível em subsuperfície obtidos pela aplicação do gesso, mesmo em um solo com moderada acidez subsuperficial (*e.g.*, saturação por bases > 35% e saturação por Al < 5%) não se confirmou. De fato, a grande maioria dos cultivos (86% dos cultivos) não apresentaram respostas positivas à aplicação do gesso agrícola. Esse resultado se deve em parte à adequada disponibilidade de S-SO_4^{2-} no solo (> 10 mg dm⁻³) mesmo após 11 anos sem reposição do nutriente no tratamento controle. Esse resultado corrobora com os apresentados em uma recente revisão sistemática da resposta das culturas à aplicação de enxofre no Brasil, aonde os autores observaram que quando o solo apresenta valores de S-SO_4^{2-} disponível superiores ao nível crítico a probabilidade de haver uma resposta positiva à fertilização é nula (Pias et al., 2019). Além disso, a boa disponibilidade hídrica na ampla maioria dos cultivos (Figura 12) contribuiu para a redução da probabilidade de resposta das culturas, em especial a soja à aplicação do gesso agrícola (Dalla Nora & Amado, 2013; Pauletti et al., 2014; Zandoná et al., 2015; Tiecher et al., 2018). Por fim, pode-se inferir que a resposta positiva das culturas ao gesso agrícola observada em vários estudos (*e.g.*, Pauletti et al., 2014; Zandoná et al., 2015; Dalla Nora et al., 2017b) possivelmente está mais relacionada à redução da toxicidade do Al^{3+} trocável do que com o incremento dos teores de cátions básicos e de S-SO_4^{2-} na subsuperfície do solo.

De qualquer forma, a recomendação atual para aplicação de gesso agrícola que é de 20% de saturação por Al na camada subsuperficial do solo (Pauletti & Motta, 2017) parece não ser a mais adequada para solos conduzidos em SPD. Recentemente, Tiecher et al. (2018) demonstraram em uma revisão sistemática da literatura que o uso de 10% de saturação por Al como nível crítico para os cereais em solos subtropicais em SPD é mais adequado. Além disso, Crusciol et al. (2016) e Dalla Nora et al. (2017a) também observaram resposta positiva das culturas de grãos ao gesso agrícola em solos com saturação por Al em subsuperfície variando entre 5 a 10%.

5. CONCLUSÕES

A aplicação combinada de calcário e gesso agrícola não apresentou efeito sinérgico quanto à melhoria dos atributos químicos do perfil do solo e na produtividade das culturas, em solo com moderada acidez superficial e baixa acidez subsuperficial. A calagem promoveu incrementos médios de 14% na produtividade de 40% dos cultivos de soja, confirmando uma maior sensibilidade da cultura da soja à acidez do solo em relação aos cereais (milho e cereais de inverno). Por outro lado, a gessagem promoveu ganhos em produtividade de grãos poucos expressivos (4% em média) e restrito a 25% dos cultivos com cereais.

A curto prazo o gesso agrícola é mais eficiente que a calagem em promover aumento dos teores de Ca^{2+} trocável ao longo do perfil do solo. Contudo, a calagem é mais efetiva na correção da acidez por alterar várias propriedades ligadas à acidez do solo ($\text{pH}_{(\text{água})}$, Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis e saturação por bases), além de apresentar maior efeito residual nos teores de Ca^{2+} trocável que o gesso agrícola. O parcelamento da dose de calcário provou ser menos eficiente na correção da acidez do solo em profundidade que a aplicação da dose total. As estratégias de calagem não se diferenciaram em relação à produtividade das culturas, contudo, o calcário de baixo PRNT apresentou maior efeito residual em relação ao calcário de alto PRNT, mantendo as condições de acidez do solo adequadas ao desenvolvimento vegetal por 11 anos. Em solos subtropicais com moderada acidez sob sistema plantio direto bem manejado a calagem superficial é eficiente em reduzir a acidez do solo em subsuperfície (até 0,60 m) já no primeiro ano após a aplicação. Nesse caso a aplicação de gesso agrícola não apresentou benefícios adicionais às propriedades do solo ou produtividade das culturas.

CAPÍTULO III – RESPOSTA DAS CULTURAS DE GRÃOS À ADUBAÇÃO SULFATADA EM SOLOS BRASILEIROS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA⁵

1. Introdução

O ciclo biogeoquímico do enxofre (S) é muito complexo e envolve fluxos nos sistemas solo, planta e atmosfera (Alvarez et al., 2007). Embora a deposição atmosférica seja uma fonte relevante de S para o solo, a quantidade aportada tem reduzido consideravelmente nos últimos anos a nível mundial, o que se deve à implementação de novas tecnologias de controle de emissão de poluentes e de legislações de regulação ambiental mais rigorosa (Divito et al., 2015; Vieira-Filho et al., 2015). Na cidade de São Paulo, por exemplo, a deposição atmosférica reduziu vinte vezes entre os anos de 1985 e 2009 [de 285 para 14 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de S (Vieira-Filho et al., 2015)]. Em cidades distantes de grandes centros industriais e do oceano, como Santa Maria (no estado do Rio Grande do Sul), a deposição atmosférica de S variou de 3,2 a 4,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de S entre os anos de 2004 e 2009 (Osório Filho et al., 2007; Tiecher et al., 2013).

No solo contém S nas formas orgânica e inorgânica, a forma orgânica prevalece em ambientes tropicais e subtropicais. O balanço entre o reservatório de S orgânico e inorgânico é governado por reações redox que são mediadas principalmente por microrganismos (Rein & Sousa, 2004; Alvarez et al., 2007; Bissani et al., 2008). Em solos bem aerados o sulfato (SO₄²⁻) é a principal forma inorgânica de S na solução do solo, a qual pode ser

⁵ Artigo publicado na **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, n. 1, p. 1–21, 2019. doi: 10.1590/18069657rbcS20180078

absorvida pelas plantas (Ercoli et al., 2012), mas pode também ser rapidamente perdida por lixiviação. O S orgânico constitui a maior reserva de S no solo [90–95% do S total do solo (Sutar et al., 2017)]. Porém, a sua disponibilidade para as plantas depende da velocidade de mineralização da matéria orgânica (MO), a qual por sua vez é dependente de fatores como: temperatura do solo, umidade, aeração, fornecimento de nutrientes, labilidade da MO e razão estequiométrica entre os nutrientes (C:N, C:P e C:S) (Scherer, 2001; Bissani et al., 2008), assim como, do estado de oxidação da MO em decomposição (Blum et al., 2013). Dessa forma, a capacidade de solos tropicais e subtropicais em suprir os requerimentos das plantas em S depende da intensidade dos processos de mineralização/imobilização e de adsorção/dessorção (Alvarez et al., 2007), assim como, da sincronia de ocorrência desses processos com os períodos de maior demanda de S pelas plantas (Ercoli et al., 2012). Portanto, o estabelecimento de recomendações efetivas de fertilizantes sulfatados para diferentes solos, culturas e condições climáticas é um grande desafio (Scherer, 2001; Bissani et al., 2008).

No Brasil, deficiências de S nas plantas normalmente são observadas em solos arenosos e com baixo teor de MO, principalmente na região do Cerrado (Rein & Sousa, 2004). Já em solos tropicais argilosos e em clima subtropical (solos arenosos e argilosos) raramente há a necessidade de adubação com S para o bom desenvolvimento das culturas (Bissani et al., 2008; CQFS-RS/SC, 2016). Consequentemente, o S é um dos macronutrientes menos estudado no Brasil (Divito et al., 2015; CQFS-RS/SC, 2016) e também em outras regiões do mundo (Kihara et al., 2017; Salvagiotti et al., 2017). No entanto, a probabilidade de se obter resposta positiva das culturas de grãos à adubação com S tem aumentado em vários ecossistemas ao redor do mundo (Rheinheimer et al., 2005; Ercoli et al., 2011; Blum et al., 2013; Divito et al., 2015; Salvagiotti et al., 2017) como consequência do (a) maior potencial produtivo das culturas o que aumenta a absorção de S (Salvagiotti et al., 2017), (b) O uso repetido de fertilizantes fosfatados e nitrogenados (alta concentração) contendo baixo teor ou ausência de S (Rheinheimer et al., 2005; Osório Filho et al., 2007), (c) redução da deposição atmosférica de S (Divito et al., 2015; Vieira-Filho et al., 2015), (d) aumento do monocultivo ou sucessão de culturas, resultando em baixo aporte de biomassa e (e) presença de barreiras

químicas e/ou físicas ao aprofundamento do sistema radicular das culturas em SPD (Dalla Nora et al., 2017). A resposta das culturas à aplicação de S em solos sob SPD no Brasil são altamente variáveis, ocorrendo desde substanciais incrementos (Miranda & Miranda, 2008; Fiorini et al., 2016; Pereira et al., 2016; Lopes et al., 2017; Nascente et al., 2017) a pequenas reduções no rendimento de grãos (Barbosa Filho et al., 2005; Megda et al., 2009; Gelain et al., 2011; Rampim et al., 2011) dependendo da cultura, solo e condições climáticas. Portanto, uma análise mais aprofundada desses fatores-chaves (*viz.*, clima, propriedades químicas do solo, espécie da cultura, potencial de rendimento de grãos) para o rendimento de grãos é imperativo buscando um manejo da adubação com S no Brasil mais sustentável.

Solos sob SPD compreendem mais de 32,8 Mha no Brasil, sendo o sistema de manejo base para a produção de grãos no país (FEBRAPDP, 2018). O SPD altera a dinâmica do S em relação ao sistema de preparo convencional (Karlen et al., 2013), aonde o solo é periodicamente revolvido e as propriedades químicas da camada arável do solo (0,00–0,20 e/ou 0,00–0,40 m) são mais uniformes (Souza et al., 2014). Em solos sob SPD de longa duração, a deposição de resíduos das culturas, calagem e aplicação e fertilizantes na superfície sem incorporação no solo aumentam mais os teores de MO na superfície do solo, criando com isso um gradiente de concentração ao longo do perfil (Dalla Nora & Amado, 2013; Souza et al., 2014). Com o aumento do pH do solo ocorre aumento da capacidade de troca de cátions (CTC), enquanto o aumento dos teores de P reduz sítios potenciais de adsorção do SO_4^{2-} por que o P (fosfato) apresenta preferência de ligação aos colóides do solo em relação ao SO_4^{2-} . Portanto, o aumento da quantidade de nutrientes na camada superficial dos solos em SPD pode induzir a uma maior ocorrência de lixiviação do S- SO_4^{2-} para camadas subsuperficiais [0,20–0,40 e 0,40–0,60 m (Scherer, 2001; Rheinheimer et al., 2005)]. No entanto, o crescimento do sistema radicular das plantas em camadas subsuperficiais do solo pode ser impedido devido a presença de camadas compactadas e/ou de restrições químicas como a presença de altos teores de Al^{3+} e baixos teores de Ca^{2+} trocável, o que é comum em solos sob SPD (Lopes et al., 2004; Rein & Sousa, 2004; Dalla Nora & Amado, 2013).

Os critérios utilizados pelos órgãos oficiais para recomendação de S no Brasil diferem entre as regiões. Dessa forma, a recomendação de S em solos subtropicais nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina é baseada no teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível ($5-10 \text{ mg dm}^{-3}$) na camada superficial do solo ($0,00-0,10 \text{ m}$) e nas necessidades específicas de cada planta (Bissani et al., 2008; CQFS-RS/SC, 2016). No estado do Paraná, a aplicação de S é recomendada quando o teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível nas camadas de $0,00-0,20$ ou $0,20-0,40 \text{ m}$ estão abaixo dos níveis críticos [3 e 9 mg dm^{-3} , respectivamente (Pauletti & Motta, 2017)]. Para solos tropicais no estado de São Paulo, adubação com S é recomendada quando o teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível na camada superficial ($0,00-0,20 \text{ m}$) está abaixo de $5-10 \text{ mg dm}^{-3}$ (Raij et al., 1997). Recomendações para a região do Cerrado (Brasil central) são baseadas no teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível nas camadas superficiais ($0,00-0,20 \text{ m}$) e subsuperficiais do solo [$0,20-0,40 \text{ m}$ (Rein & Sousa, 2004)]. Em adição ao teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível, Sfredo et al. (2003) sugeriram utilizar diferentes níveis críticos de S de acordo com os teores de argila do solo.

Praticamente todos os estudos que deram origem às atuais recomendações de adubação com S no Brasil foram conduzidas durante os anos de 1970–1990 com culturas de baixo potencial produtivo e em sistema de preparo convencional (Lopes et al., 2004; Rein & Sousa, 2004; Bissani et al., 2008; CQFS-RS/SC, 2016; Pauletti & Motta, 2017). É, portanto, imperativo revisar as recomendações de adubação com S existentes para solos sob SPD e com culturas de alto potencial produtivo buscando identificar necessidades de mudanças/adaptações nas recomendações de S. Nesse estudo, conduziu-se uma revisão sistemática de todos os estudos existentes no tópico visando compilar, resumir e acessar a resposta das culturas de grãos à adubação com S em solos sob SPD e para confirmar a efetividade das recomendações de S para solos em SPD utilizadas atualmente no Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Compilação dos dados

O estudo foi baseado em dados reportados em 32 artigos científicos revisados por pares, um artigo técnico e duas dissertações de mestrado que avaliaram a resposta das culturas à adubação com S em solos sob SPD no Brasil. Os dados obtidos abrangeram um total de 58 cultivos (Figura 22). Para este propósito, realizou-se uma pesquisa bibliográfica nos bancos de dados Web of Science, Science Direct, Scielo, e Google Scholar a partir das seguintes palavras-chaves “enxofre”, “enxofre elementar”, “sulfato de amônio”, “gesso”, “plantio direto”, e “rendimento de grãos”, e seus termos correspondentes em inglês. Publicações que atenderam a algum dos critérios a seguir foram excluídas do banco de dados: (a) estudos que avaliaram unicamente a produção de biomassa, raízes ou outros órgãos vegetativos; (b) experimentos conduzidos em sistema de preparo convencional ou em casa de vegetação; (c) estudos realizados fora do Brasil; (d) ausência de tratamento controle (sem aplicação de S) e (e) experimentos com menos de três repetições e/ou com ausência de casualização.

Em estudos aonde o gesso ou S-elementar foram utilizados como fonte de S, os resultados foram comparados com o tratamento controle (*i.e.*, sem adubação com S) (Tabela 6). Quando o sulfato de amônio ou superfosfato simples foram utilizados como fonte de S, os resultados foram comparados nos tratamentos com ureia e superfosfato triplo nas mesmas doses de N e P, respectivamente. Finalmente, quando a fonte de S foi o gesso a dose máxima considerada foi de 1 Mg ha^{-1} (equivalente a $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$) a fim de se evitar um confundimento do uso de altas doses de gesso como condicionador de solo, potencialmente aumentando os teores de Ca^{2+} trocável e reduzindo a atividade do Al^{3+} trocável em camadas subsuperficiais. Para cada cultivo os dados foram categorizados em termos de propriedades do solo, ambiente de cultivo e especificações da cultura, conforme a seguir:

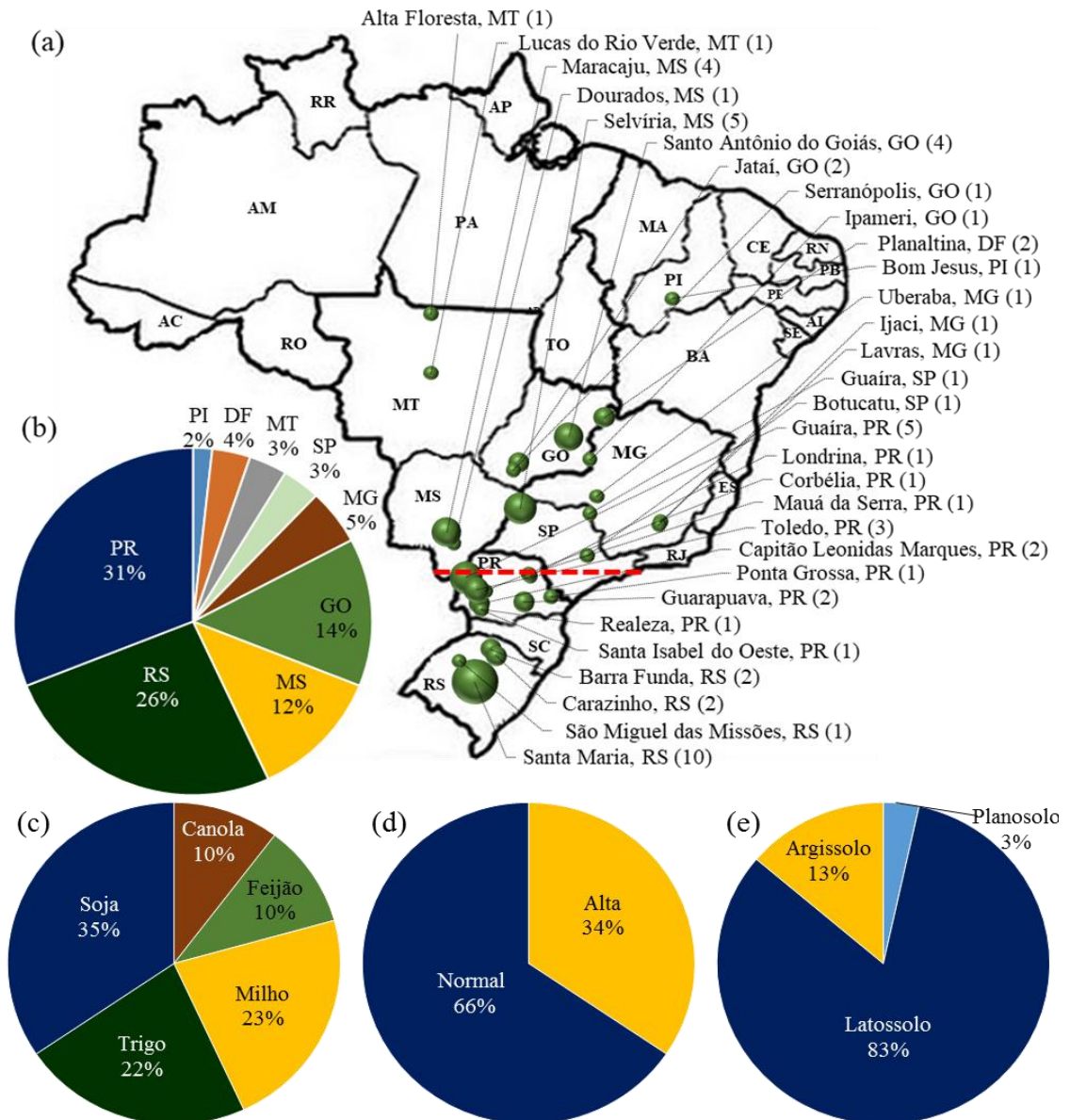


Figura 22. Distribuição geográfica dos cultivos por cidade (a) e frequência relativa de cultivos agrupados por estado (b), por espécie de cultura (c), pela média produtiva (d) e pelo tipo de solo (e) em estudos que avaliaram o efeito da adubação com S em solos sob sistema plantio direto no Brasil. A linha vermelha tracejada delimita as zonas climáticas tropical (acima) e subtropical (abaixo).

1. Teor de argila do solo na camada de 0,00–0,20 m: $\leq 35\%$ ou $> 35\%$, o qual é o limite entre solos argilosos e de textura média. Todos os estudos nessa categoria utilizaram o método da pipeta para determinar o teor de argila do solo.
2. Teor de MO do solo na camada de 0,00–0,20 m: $\leq 2,5\%$ ou $> 2,5\%$, o qual é o limite entre as classes de baixo e médio teor de MO (CQFS-RS/SC, 2016).

3. Teor de S-SO₄²⁻ disponível na camada de 0,00–0,20 e 0,20–0,40 m: acima e abaixo dos níveis críticos utilizados pela CQFS-RS/SC (2016), os quais são de 5 mg dm⁻³ para culturas de baixa demanda por S (cereais) e 10 mg dm⁻³ para culturas de alta demanda por S (soja, feijão-comum e canola). Todos os estudos utilizaram como extratores para o S-SO₄²⁻ disponível o fosfato de cálcio [Ca(PO₄)₂]. De acordo com Blum et al. (2014), os extratores de S-SO₄²⁻ disponível comumente utilizado no Brasil são o Ca(PO₄)₂ e o NH₄OAc + HOAc, os quais geram resultados com pequenas diferenças em sua magnitude, mas com alta correlação ($r = 0,98$).
4. pH_(água) do solo na camada de 0,00–0,20 m: ≤ 5,5 ou > 5,5, o qual é o valor limite para a recomendação de calagem em solos sob SPD para culturas de grãos (CQFS-RS/SC, 2016). Quando o pH do solo foi mensurado em solução de CaCl₂, o valor de pH_(CaCl₂) reportado foi acrescido de 0,7 unidades para estimar o pH_{água}.
5. Classe de solo: como Latossolo, Argissolo e Planossolos, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de solos (Santos et al., 2013).
6. Produtividade média de grãos: alta ou normal - alta se excedeu a média de produtividade de grãos do respectivo estado e ano em mais de 30%, conforme reportado pela Conab (2018), caso contrário normal.
7. Espécie da cultura: soja, feijão, canola, milho ou trigo.
8. Zona climática: subtropical ou tropical.

2.2 Análise dos dados

O efeito da aplicação de S no rendimento de grãos de diferentes culturas, regiões e cultivos foram comparados utilizando-se a equação 1, para calcular o rendimento relativo de grãos de cada tratamento em relação ao maior rendimento obtido no respectivo cultivo, o qual foi considerado como referência (Tiecher et al., 2018):

$$\text{Produtividade relativa do cultivo (\%)} = \frac{\text{Produtividade do tratamento (Mg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Tratamento com a maior produtividade do cultivo (Mg ha}^{-1}\text{)}} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Tabela 6. Resumo das principais informações dos estudos incluídos nesta revisão sistemática.

Referência	Cultura	Ano	Efeito ^s	Dose de enxofre (kg ha ⁻¹)							Fonte
				0	15	30	45	60	–	–	
Rheinheimer et al. (2005)	Soja	2002/03	ns	3,26	3,00	3,10	–	3,29	–	–	SFS
Osório Filho et al. (2007)	Feijão	2004/05	*	2,60	2,64	3,01	–	3,08	–	–	SFS
Osório Filho et al. (2007)	Trigo	2005	ns	1,72	2,07	1,96	–	1,86	–	–	SFS
Osório Filho et al. (2007)	Soja	2004/05	ns	1,68	2,00	1,93	–	1,98	–	–	SFS
Osório Filho et al. (2007)	Canola	2005	ns	1,05	1,13	1,20	–	1,09	–	–	SFS
Lucas et al. (2013)	Canola	2010	*	0,83	0,89	0,92	–	0,95	–	–	SFS
Miranda & Miranda (2008)	Milho	2000/01	*	5,62	7,46	7,73	7,78	–	–	–	Gesso
Miranda & Miranda (2008)	Milho	2001/02	*	5,36	5,94	6,67	7,75	–	–	–	Gesso
				0	5	10	20	40	60	–	
Nascente et al. (2017)	Feijão	2014	*	2,68	–	3,28	3,26	3,15	2,66	–	AS
Rheinheimer et al. (2005)	Milho	2002/03	*	8,28	10,32	10,35	10,44	–	–	–	SFS
Rheinheimer et al. (2005)	Canola	2003	ns	1,19	1,52	1,25	1,42	–	–	–	SFS
Tiecher et al. (2013)	Trigo	2007	ns	2,39	2,38	2,24	2,45	–	–	–	Gesso
				0	20	40	60	80	100	160	
Crusciol et al. (2006)	Feijão†	2004	*	2,37	2,54	2,63	2,66	2,53	–	–	SA
Rampim et al. (2011)	Soja	2006/07	ns	3,74	–	–	–	–	–	3,53	Gesso
Rampim et al. (2011)	Soja†	2006/08	ns	2,94	–	–	–	–	–	2,86	Gesso
Rampim et al. (2011)	Trigo†	2006	ns	2,30	–	–	–	–	–	2,03	Gesso
Rampim et al. (2011)	Trigo†	2006	ns	1,37	–	–	–	–	–	1,44	Gesso
Gelain et al. (2011)	Soja†	2007/08	ns	2,32	–	–	–	–	–	2,27	Gesso
Zandoná et al. (2015)	Milho	2012/13	*	10,39	–	–	–	10,98	–	11,00	Gesso
Zandoná et al. (2015)	Soja	2012/13	*	2,73	–	–	–	2,97	–	2,97	Gesso
Dalla Nora & Amado (2013)	Soja†	2010/11	ns	3,78	–	–	–	–	–	3,68	Gesso
Dalla Nora & Amado (2013)	Milho†	2010/11	ns	10,69	–	–	–	–	–	10,74	Gesso
Dalla Nora et al. (2017)	Trigo†	2012	ns	2,28	–	–	–	–	–	2,33	Gesso
Sávio et al. (2011)	Soja	2005/06	*	1,65	–	–	–	1,97	–	2,10	Gesso
Lopes et al. (2017)	Soja	2015/16	*	1,42	1,52	1,62	1,68	1,64	1,68	–	Fator
Marchesan et al. (2017)	Soja	2012/13	ns	3,21	–	–	–	–	3,2	3,21	Gesso
Marchesan et al. (2017)	Soja	2013/14	ns	3,49	–	–	–	–	3,50	3,52	Gesso
Neis et al. (2010)	Soja	2007/08	ns	4,40	–	–	–	–	–	4,41	Gesso
Soares (2016)	Soja	2014/15	ns	3,00	–	–	–	–	–	3,00	Gesso
Soares (2016)	Milho	2015/16	ns	7,00	–	–	–	–	–	7,00	Gesso
				0	30	60	90	120	128	180	
Primo et al. (2012)	Soja	2009/10	ns	4,16	4,08	4,02	–	4,04	–	4,19	S ⁰
Moda et al. (2013)	Soja†	2005/06	ns	2,46	2,48	2,51	2,69	2,50	–	–	Gesso
Franceloso et al. (2010)	Milho†	2005/06	ns	8,48	8,69	–	–	–	–	–	S ⁰
Rampim et al. (2015)	Soja	2011/12	ns	2,64	–	–	–	–	2,77	–	Gesso
				0	35	40	42	42–S ⁰	80	80–S ⁰	
Fiorini et al. (2016)	Milho	2008/09	*	7,56	–	–	8,68	8,45	–	–	SA
Fiorini et al. (2016)	Milho	2008/09	ns	5,49	–	–	5,69	5,58	–	–	SA
Fano (2015)	Trigo	2013	ns	1,40	–	–	–	–	1,47	1,57	Fator
Fano (2015)	Trigo	2013	*	2,02	–	–	–	–	2,12	2,35	Fator
Fano (2015)	Trigo	2013	ns	1,23	–	–	–	–	1,21	1,17	Fator
Megda et al. (2009)	Trigo	2005	ns	3,21	3,17	–	–	–	3,14	–	SA
Megda et al. (2009)	Trigo	2006	ns	3,22	3,09	–	–	–	3,30	–	SA
				0	27	50	51	68	–	–	
Pereira et al. (2016)	Soja†	2013/14	*	3,43	–	4,37	–	–	–	–	S ⁰
Mendes et al. (2014)	Milho	2012/13	ns	12,31	–	12,28	–	–	–	–	S ⁰
Mendes et al. (2014)	Milho	2012/13	*	12,55	–	–	–	13,24	–	–	S ⁰
Werner et al. (2013)	Canola	2011	ns	2,17	2,17	–	2,17	–	–	–	SA
				0	23	46	69	92	115	138	
Kaefer et al. (2014)	Canola	2009	ns	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	SA
Kaefer et al. (2014)	Canola	2010	ns	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	SA
Prando et al. (2013)	Trigo	2009	ns	1,82	–	1,82	–	1,82	–	1,82	SA
Galetto et al. (2017)	Trigo†	2014	ns	3,85	–	3,85	–	3,85	–	3,90	SA
				0	58	115	173	–	–	–	
Lourente et al. (2007)	Milho†	2001/02	ns	5,87	5,87	5,87	5,87	–	–	–	SA
Yano et al. (2005)	Trigo	2003	ns	3,82	3,46	–	–	–	–	–	SA
				0	40	40	40	40	40	40	
Broch et al. (2011)	Soja ¹	2003-05	*	2,88	3,15	3,38	3,18	2,97	3,25	3,37	Fator
				0	13	25	29	38	57	86	
Lange et al. (2014)	Milho	2008/09	ns	6,39	6,41	6,41	6,38	6,41	6,38	6,38	SA
				0	69	103	137	171	–	–	
Barbosa Filho et al. (2005)	Feijão	1999	ns	3,75	3,65	3,65	3,65	3,65	–	–	SA
Barbosa Filho et al. (2005)	Feijão	2000	ns	2,69	2,58	2,58	2,58	2,58	–	–	SA
Barbosa Filho et al. (2005)	Feijão	2001	ns	2,81	2,71	2,71	2,71	2,71	–	–	SA

^s Efeito nos estudos originais, sendo significativo ($p < 0,05$) e ^{ns} não significativo. S⁰ = Enxofre elementar. SFS = Superfosfato simples. SA = Sulfato de amônio. Fator = Mais de uma fonte de S foi testada. † = Dados extraídos diretamente de figuras. 1 = Valores médios de três cultivos.

A relação potencial entre o rendimento relativo para cada cultivo e teor de S foliar foi examinado para 31 cultivos reportados em 17 estudos. Os dados de estudos que reportaram os teores de S-SO₄²⁻ disponível, os quais abrangeram 48 cultivos para a camada superficial do solo (0,00–0,20 m) e 34 cultivos para camada subsuperficial (0,20–0,40 m), foram utilizados para a construção de uma curva de calibração do S-SO₄²⁻ disponível no solo, a qual foi construída a partir da relação do teor inicial de S-SO₄²⁻ disponível no solo e o rendimento relativo das culturas de parcelas que não receberam adubação com S (controles) (CQFS-RS/SC, 2016; Vieira et al., 2016). A dose recomendada de S para se obter pelo menos 95% do rendimento máximo das culturas, o qual foi considerado como sendo a máxima eficiência econômica (MEE), foi determinada pela plotagem do rendimento relativo das culturas em cada dose de S e a respectiva dose utilizada (Tiecher et al., 2018). Curvas de resposta das culturas foram obtidas pela plotagem do rendimento relativo das culturas com o teor de SO₄²⁻-S disponível no solo e as doses de S avaliadas (Equação 2), utilizando-se o software Sigma Plot 12,5 (Systat Software, San Jose, CA, USA).

$$\text{Produtividade relativa (\%)} = \text{Máxima produtividade (100\%)} \times (1 - 10^{-bx}) \quad \text{Eq. 2}$$

A resposta das culturas à adubação com S em função dos fatores de variação foi avaliada pelo procedimento estatístico de proporções de diferenças, através do teste de randomização baseado em 4999 repetições no software Statkey v. 2.0.1 (Lock et al., 2017). Quando os resultados obtiveram valores de $p < 0,05$ assumiu-se como sendo significativas as diferenças. Os principais fatores que influenciam na resposta das culturas à adubação com S foram identificados utilizando-se a análise de árvore de regressão no software Jmp® v. 13 (SAS, Inc., Cary, NC, USA). Esse procedimento é indicado para banco de dados obtidos por pesquisas na literatura, como revisões sistemáticas e meta-análises aonde os estudos utilizados não apresentam necessariamente os mesmos fatores de variação e os mesmos níveis de fertilizante avaliado (Mourtzinis et al., 2018). De acordo com Tittonel et al. (2008), a árvore de regressão não realiza presunções sobre a distribuição

estatística dos dados, além de ser robusta à presença de *outliers* e multiconialidade dos dados.

Foi acessado a importância de variáveis categóricas (espécie da cultura, zona climática, estado de condução do estudo, classe de solo, produtividade média da cultura) e contínuas (teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível, MO, argila e $pH_{(água)}$, e dose de S) juntas, como fatores de variação na partição, e a resposta das culturas à adubação com S (*viz.*, resposta positiva ou ausência de diferença estatística) como variável resposta. A partição dos dados foi baseada no teste global de nulidade da hipótese de interdependência ($p < 0,05$) entre as variáveis fatores de variação e a variável resposta. Quando a hipótese é rejeitada, o algoritmo identifica o fator de maior associação com a variável resposta (Mourtzinis et al., 2018). Para assegurar um adequado poder estatístico em todos os passos da análise e evitar a particularização dos resultados, cada nó intermediário da árvore de decisão mantiveram pelo menos 10 cultivos ($> 20\%$ do conjunto de dados), e nos nós terminais pelo menos 5 cultivos ($> 10\%$ do conjunto de dados).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos estudos de adubação com S no Brasil

Estudos avaliando o efeito da aplicação de doses de S na produtividade de culturas de grãos conduzidas em solos sob SPD no Brasil são relativamente recentes, tendo início em 2005, porém a maioria (57%) foi publicada entre 2013 e 2017 (Tabela 6). Os estudos focaram nas regiões Sul e Central do Brasil (Figura 22a), contemplando 83% do total de cultivos. Os estados com maior número de cultivos foram o Paraná (31%), Rio Grande do Sul (26%), Goiás (14%), e Mato Grosso do Sul (12%) (Figura 22b). Os cultivos avaliados em zonas climáticas tropicais corresponderam a 43%, enquanto os demais foram conduzidos em clima subtropical (Figura 22a). Soja, milho e trigo combinados corresponderam a 78% dos cultivos (Figura 22c), o que reflete a importância econômica dessas culturas para o Brasil. A produtividade média dos cultivos foi considerada alta em apenas 34% dos cultivos (Figura 22d). A grande maioria dos estudos foram conduzidos em Latossolos (83%), seguidos

por Argissolos (14%) e Planossolos (3%) (Figura 22e) de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013). Latossolos é a classe de solos agrícolas predominante no Brasil (Dalla Nora & Amado, 2013). Como pode ser observado na Figura 23a, os solos em 94% dos estudos apresentavam teores de MO classificados como médios ou baixos (< 5%; CQFS-RS/SC, 2016). Os solos em 77% dos estudos eram argilosos (> 35% de argila; Figura 23b), e em 75 % dos estudos, os teores de S-SO₄²⁻ disponível eram menor que 10 mg dm⁻³ (Figura 23c). Finalmente, o pH_{água} do solo nos estudos primários apresentaram baixa variação, sendo que 50% dos solos tinham pH_{água} entre 5,2 e 5,8 (Figura 23d).

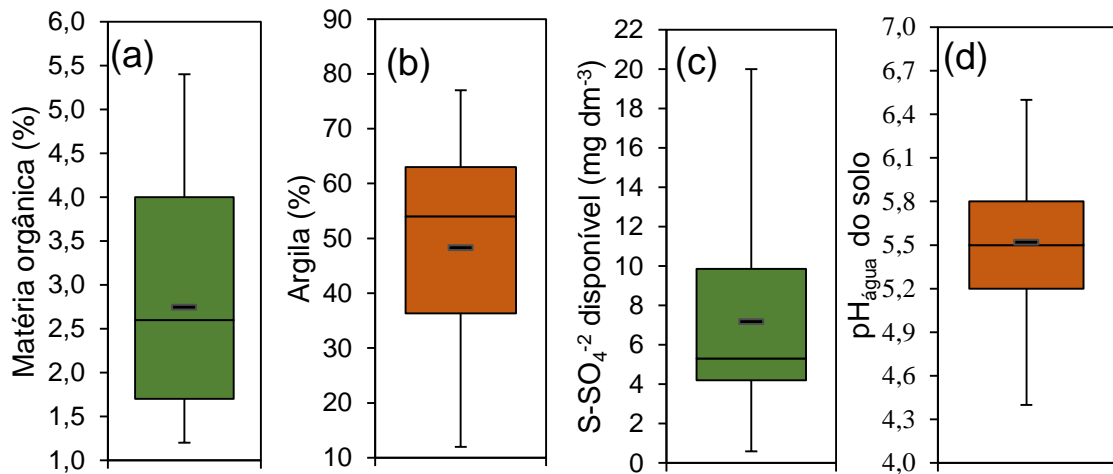


Figura 23. Estatística descritiva dos parâmetros de solo (0,00–0,20 m): matéria orgânica (a), argila (b), S-SO₄²⁻ disponível (c) e pH_{água} (d) dos estudos que avaliaram o efeito da adubação com S na produtividade de culturas de grãos em sistema plantio direto no Brasil. O retângulo central do box plot abrange valores entre o primeiro e terceiro quartil. A linha sólida no retângulo é a mediana e o traço a média. As linhas verticais acima e abaixo do box plot representam os valores máximos e mínimos, respectivamente.

3.2 Resposta positiva das culturas de grãos à adubação com S

O teor de S-SO₄²⁻ disponível foi a única propriedade do solo entre as estudadas que influenciou a resposta das culturas à adubação com S (Figura 24a). O teor crítico de S-SO₄²⁻ disponível [viz., 5 e 10 mg dm⁻³ para culturas com baixa e alta demanda por S, respectivamente (CQFS-RS/SC, 2016)] provou ser um eficiente critério para definir a resposta das culturas à adubação com S. Dessa forma, não foi observado resposta positiva das culturas à

adubação com S em solos com teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível acima do nível crítico em nenhum dos cultivos avaliados.

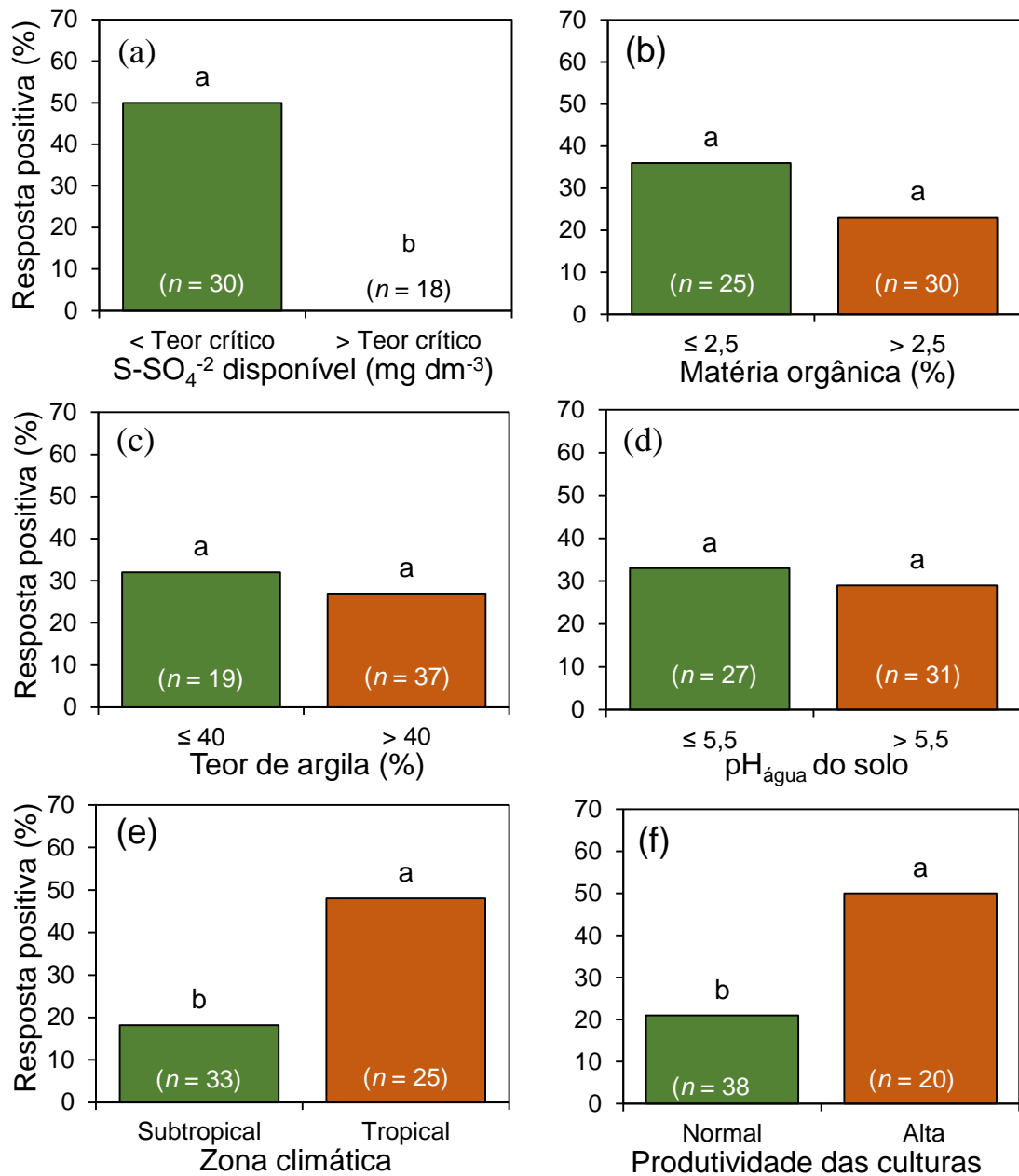


Figura 24. Frequência relativa da resposta positiva das culturas à adubação com S em solos sob sistema plantio direto com diferentes níveis de $S-SO_4^{2-}$ disponível (a) matéria orgânica (b), argila (c) e $pH_{\text{água}}$ (d) em função da zona climática (e) e da produtividade média das culturas (f). O número de cultivos em cada subgrupo é apresentado entre parênteses.

Em solos com deficiência de $S-SO_4^{2-}$, no entanto, respostas positivas foram observadas em 50% dos cultivos. Esse resultado mostra que as recomendações existentes, estabelecidas para sistema de preparo

convencional são aplicáveis para solos sob SPD, especialmente quando os teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível estão acima do nível crítico. No entanto, se os teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível estão abaixo do nível crítico, as recomendações poderiam ser refinadas, por meio da adição de fatores de decisão, como por exemplo, considerando propriedades do solo (valor de pH e teores de argila e MO), clima e características da cultura, a fim de tornar as recomendações mais eficazes.

Como pode ser visto nas Figuras 24b e 24c, a resposta das culturas à adubação com S é independente dos teores de MO e de argila do solo. Solos argilosos com mineralogia oxidica adsorvem mais rapidamente o sulfato, reduzindo assim a sua lixiviação para camadas subsuperficiais (Alvarez et al., 2007; Ercoli et al., 2011). No entanto, solos com essas características podem resultar também em alta estabilização da MO, por meio de interações organomineral e, portanto, reduzir a atividade microbiana e a mineralização de S da MO (Cotrufo et al., 2013), a qual é a principal fonte de $S-SO_4^{2-}$ disponível para as plantas (Alvarez et al., 2007; Tiecher et al., 2013). Por outro lado, solos com baixo teor de MO, apresentam em sua maioria baixa qualidade química, física e microbiológica (Mendes et al., 2018), o que normalmente reduz o potencial produtivo das culturas e, conseqüentemente, a demanda por S (Alvarez et al., 2007).

Outro fator que precisa ser considerado é a deposição atmosférica de S, a qual aumenta em áreas próximas de cidades industrializadas e do oceano (Tiecher et al., 2013; Vieira-Filho et al., 2015). Essa deposição pode, portanto, causar um confundimento na interpretação do efeito dos teores de MO e da textura do solo na resposta das culturas à adubação com S. Além disso, o fato da resposta das culturas à adubação com S não estar relacionada com o teor de argila e MO pode ser resultado dos diferentes recentes históricos de manejo da adubação com S entre as áreas. Eriksen et al. (1995) estudaram vários tipos de solo na Dinamarca e observaram que a mineralização da MO e, conseqüentemente, a disponibilidade de $S-SO_4^{2-}$ para as plantas não estava correlacionada com os teores de MO, mas sim com a atividade microbiológica. Portanto, o desenvolvimento de ferramentas simples e de baixo custo para quantificar a atividade microbiológica do solo pode ser muito útil para melhorar as recomendações de S para culturas em solos sob SPD.

O $\text{pH}_{(\text{águas})}$ do solo pode influenciar na resposta das culturas à adubação com S. De fato, solos com alto $\text{pH}_{(\text{águas})}$ facilitam a lixiviação de S-SO_4^{2-} para camadas subsuperficiais (Rheinheimer et al., 2005; Sutar et al., 2017). Porém, em nosso estudo não foi observado nenhum efeito do $\text{pH}_{(\text{águas})}$ do solo sob a resposta das culturas (Figure 24d), o que pode estar relacionado a que mais de 75% dos solos estudados tinham $\text{pH}_{(\text{águas})} < 5,8$ (Figure 23d).

Baseado nos resultados da presente revisão sistemática, culturas crescendo em solos tropicais apresentam maior probabilidade de responder positivamente à adubação com S do que em solos subtropicais (48% vs 18%; Figura 24e), o que é consistente com resultados prévios (Rein & Sousa, 2004; Alvarez et al., 2007). Esse resultado pode ser atrelado a vários fatores como, a baixa fertilidade natural dos solos e a alta intemperização dos solos dessa zona climática (Fageria & Nascente, 2014). Os resultados também sugerem que culturas com maior potencial produtivo apresentam maior probabilidade de resposta positiva à adubação com S (Figure 24f). Isso ocorre por que culturas com maior rendimentos extraem maior quantidade de S do solo [viz., 0,1–0,5% da massa seca (Alvarez et al., 2007; CQFS-RS/SC, 2016; Sutar et al., 2017)], dessa forma, espera-se aumento dos requerimentos de S do solo com o aumento da produtividade das culturas (Rheinheimer et al., 2005; Salvagiotti et al., 2017). No Brasil, a produtividade média nos últimos 10 anos (2006–2016) da soja e do milho aumentaram em 30 e 85% comparado à média da década de 90 (1990–2000) (CONAB, 2018); portanto, a probabilidade de se obter resposta positiva pela aplicação de S nas culturas de grãos tem aumentado.

Somente 18 (31%) dos 58 cultivos avaliados apresentaram resposta positiva significativa à aplicação de S (Figura 25a). Milho e feijão foram as culturas mais responsivas, com incrementos na produtividade em 46% ($n = 13$) e 50% ($n = 6$) dos cultivos, respectivamente. A soja respondeu positivamente em 35% ($n = 20$) dos cultivos. Por outro lado, o trigo apresentou resposta positiva em apenas um dos 13 cultivos avaliados e a canola em um de seis cultivos. A maior resposta do milho e da soja em relação a trigo e canola, possivelmente está associada com o maior potencial genético de novos híbridos e cultivares, respectivamente, além do uso mais intensivo de novas tecnologias no manejo (Mendes et al., 2018) proporcionando maior rendimento dessas culturas. Com o aumento da demanda das culturas por S, o teor de S-

SO_4^{2-} disponível acrescido da deposição atmosférica de S podem não serem suficientes para suprir as exigências nutricionais das plantas e para repor as perdas de S-SO_4^{2-} para o sistema (Rheinheimer et al., 2005; Alvarez et al., 2007; Ercoli et al., 2012).

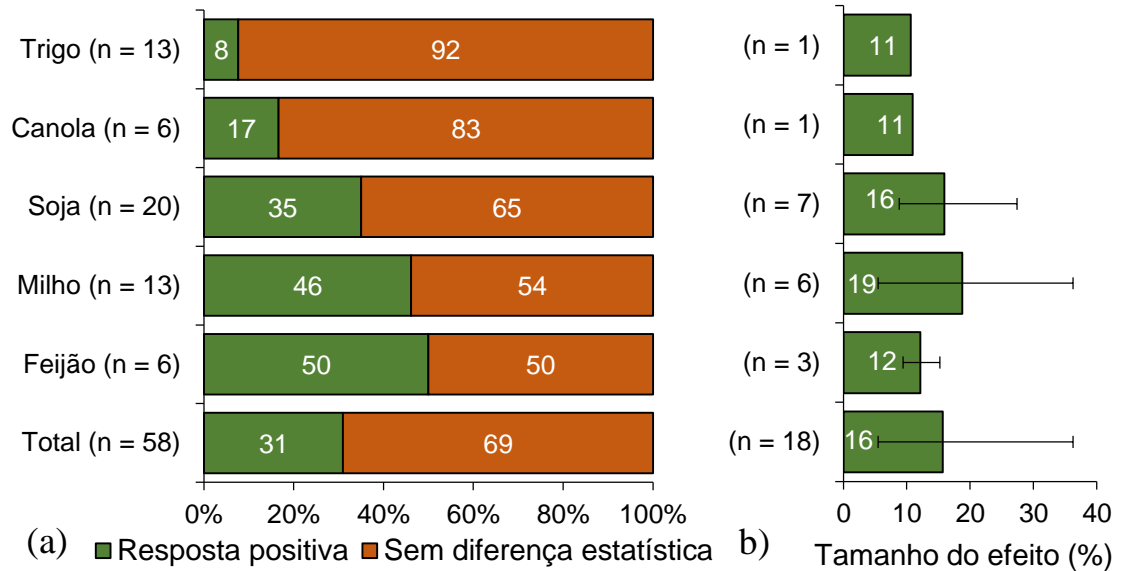


Figura 25. Frequência relativa da resposta das culturas de grãos à adubação com enxofre em solos sob sistema plantio direto no Brasil (a) e média de incremento no rendimento de grãos (%) dos cultivos com resposta positiva. Barras de erros representam os valores máximos e mínimos.

Nos cultivos que apresentaram resposta positiva à aplicação de S, o milho foi o que apresentou a maior média de incremento em produtividade (6–36%, média = 19%), sendo seguido pela soja (9–27%, média = 16%), e feijão (9–15%, média = 12%) (Figura 25b). Na média de todas as culturas com resposta positiva à adubação com S o incremento em rendimento de grãos foi de 16%. Na Argentina, Salvagiotti et al. (2017) reportaram respostas positivas do milho à adubação com S em 8 de 17 cultivos, com um incremento médio em produtividade de grãos de 13%. Em áreas sob sistema de preparo convencional na África, uma meta-análise conduzida por Kihara et al. (2017) revelaram que 76% dos cultivos responderam positivamente à adubação com S, com aumento médio de 35% no rendimento de grãos. Esses resultados comprovam a importância de um adequado manejo da adubação com S, objetivando o aumento da produtividade das culturas, e com isso atender à crescente demanda mundial por alimentos (FAO, 2015) e aumentar a rentabilidade dos produtores.

3.3 Influência da dose de S aplicada na produtividade das culturas

Baseado na curva de calibração considerando apenas os cultivos que responderam positivamente à aplicação de S ($p < 0,05$) nos estudos primários, a dose de S de máxima eficiência econômica (MEE) foi de 26 kg ha^{-1} . Essa dose que foi suficiente para a obtenção de pelo menos 95% do rendimento máximo em todos os cultivos (Figura 26a), é idêntica a encontrada por Carmona et al. (2009) para o arroz irrigado, a qual foi determinada com base em 12 experimento conduzidos em sistema de preparo convencional no estado do Rio Grande do Sul. Em adição, a dose obtida nesse estudo é similar às oficialmente recomendadas para as regiões de clima tropical do Cerrado (Rein & Sousa, 2004), para o estado de São Paulo (Raij et al., 1997), e para áreas subtropicais no Sul do Brasil (CQFS-RS/ SC, 2016): (20 kg ha^{-1} de S). As doses de S recomendadas para o estado do Paraná variam entre 20 e 40 kg ha^{-1} , dependendo da espécie da cultura (Pauletti & Motta, 2017). No entanto, esses valores diferem significativamente dos recomendados por Sfredo et al. (2003) para a soja que são de 70 a 110 kg ha^{-1} de S, dependendo da disponibilidade de S-SO_4^{2-} no solo. Salvagiotti et al. (2017) determinaram como sendo de 10 kg ha^{-1} de S a dose de MEE para a cultura do milho conduzida em SPD na Argentina. Em dois experimentos com lisímetros na Itália, Ercoli et al. (2012) determinaram que o trigo (*Triticum durum* L.) absorveu na média de duas cultivares 32 kg ha^{-1} de S; porém, apenas 25% (8 kg ha^{-1}) foi exportado via grãos. A lixiviação S-SO_4^{2-} para esses solos que continham menos 32% de argila, foi de 35 kg ha^{-1} , a deposição atmosférica de S foi de $14,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Portanto, para a reposição do S perdido para o sistema e exportado via grãos seria necessário a aplicação de $28,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de S, dose similar a determinada nessa revisão com estudos apenas do Brasil.

A partir dos resultados apresentados nessa revisão e das recomendações oficiais de S em prática no Brasil (Raij et al., 1997; Rein & Sousa 2004; CQFS-RS/SC, 2016; Pauletti & Motta, 2017), pode-se concluir que mesmo para solos deficientes em S-SO_4^{2-} , normalmente pequenas doses de S são suficientes para o bom desenvolvimento das culturas. Ercoli et al. (2012) observaram que o teor de S-SO_4^{2-} na solução do solo muda

significativamente de acordo com a ocorrência de chuvas e da taxa de mineralização MO ao longo do ciclo das culturas. Como resultado, pequenas doses de S normalmente são suficientes para suprir os requerimentos nutricionais das plantas (Salvagiotti et al., 2017). A fertilização com S objetiva principalmente manter os teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível do solo, pois mais de 70% do total de S absorvido pelas plantas é de origem do solo e não do fertilizante aplicado no corrente ano, dessa forma, a fertilização contribui na reposição de S extraído pelas plantas e das perdas de S no sistema (Degryse et al., 2018).

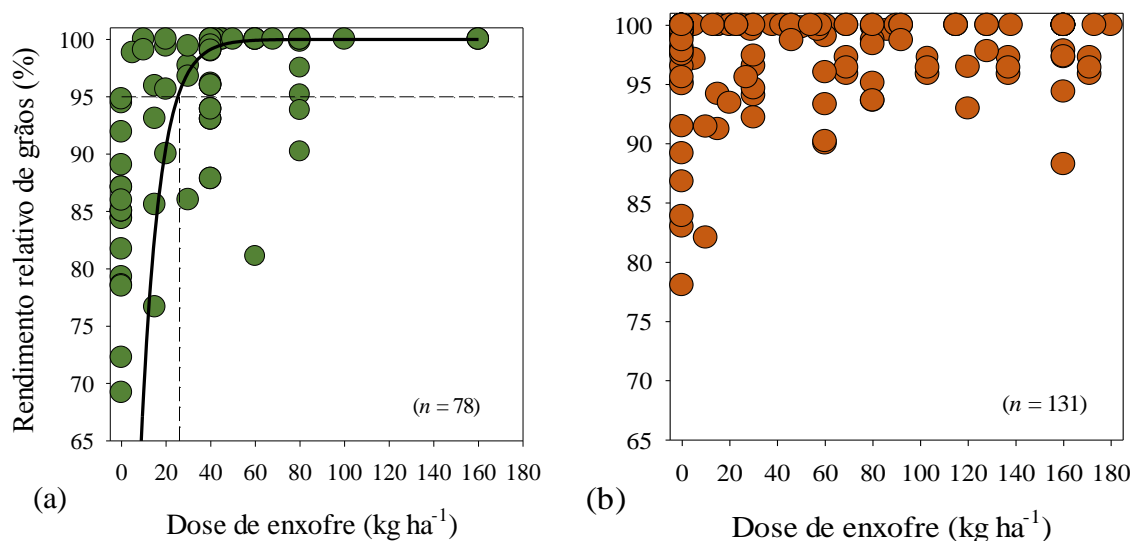


Figura 26. Rendimento relativo de grãos de diferentes culturas em cultivos com (a) e sem (b) resposta positiva à aplicação de diferentes doses de enxofre em solos sob sistema plantio direto no Brasil. O número de observações em cada subgrupo é apresentado entre parênteses.

3.4 Influência da fonte de S na resposta das culturas

A pequena dose de S (~ 26 kg ha⁻¹) a ser aplicada nas culturas visando suplementar a quantidade fornecida pelo solo para satisfazer as necessidades nutricionais das plantas pode ser realizada utilizando diferentes fontes. As fontes de S mais utilizadas no Brasil são o sulfato de amônio [(NH₄)₂SO₄, 22–24% S], superfosfato simples (10–12% S), sulfato de potássio (K₂SO₄, 15–17% S), sulfato de cálcio (gesso, CaSO₄, 13% S), e S-elementar (95% S). Todas essas fontes com exceção do S-elementar apresentam o S na forma de SO₄²⁻, o qual é disponível para as plantas logo após a solubilização

do fertilizante (Horowitz & Meurer, 2006). Por outro lado, o S-elementar necessita ser oxidado a SO_4^{2-} antes de se tornar disponível. O S-elementar é oxidado principalmente por microorganismos autotróficos e heterotróficos, sendo que a taxa de oxidação é dependente de vários fatores como: granulometria do fertilizante, aeração do solo, temperatura, umidade, teor de MO e de nutrientes, acidez do solo e biomassa microbiana (Horowitz & Meurer, 2006, 2007). Horowitz & Meurer (2007) avaliaram a oxidação do S-elementar em 42 amostras de solo de diferentes estados do Brasil e concluíram que todos os solos foram capazes de oxidar o S-elementar, no entanto, em taxas significativamente diferentes. Em média, a aplicação do S-elementar aumenta significativamente a disponibilidade de SO_4^{2-} no solo para as plantas após 20 dias de sua aplicação (Horowitz & Meurer, 2006).

A eficiência das fontes de S citadas acima tem sido avaliadas em experimentos em SPD no Brasil. Fiorini et al. (2016) não encontraram diferenças significativas na produtividade das culturas em função das fontes S-elementar e sulfato de amônio. Por outro lado, Broch et al. (2011) observaram que a aplicação de várias fontes de S como o superfosfato simples, gesso em pó e gesso granulado aumentaram a produtividade da cultura da soja, porém o uso do S-elementar não apresentou efeito. Fano (2015) determinou que o S-elementar foi mais eficiente que o gesso em aumentar a produtividade da cultura do trigo. Esses resultados contrastantes mostram a necessidade de investigações mais aprofundadas na temática, a fim de determinar em quais ambientes fontes com S rapidamente disponível para as plantas (e.g., gesso, superfosfato simples) ou aqueles que necessitam ser oxidados para tornar-se disponível (e.g., S-elementar) são mais eficientes (Broch et al., 2011; Degryse et al., 2018). Como um fertilizante de liberação lenta o S-elementar permite a aplicação de doses maiores de S, devido ao seu alto efeito residual e menor potencial de perdas em curto prazo, o que aumenta a eficiência do uso do S pelas plantas, especialmente em solos arenosos e com alta precipitação (Degryse et al., 2018).

3.5 Produtividade de grãos das culturas em função do teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo

Os teores críticos de S-SO₄²⁻ disponível nas camadas superficiais dos solos (0,00–0,10 e 0,00–0,20 m) do Brasil normalmente são entre 3 e 10 mg dm⁻³, extraído por Ca(PO₄)₂ (Raij et al., 1997; Lopes et al., 2004; CQFS-RS/SC, 2016; Pauletti & Motta, 2017). No entanto, vários estudos têm observado ausência de correlação entre o teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo e a produtividade de grãos das culturas (Rheinheimer et al., 2005; Osório Filho et al., 2007; Lucas et al., 2013) mesmo em solos com teores de S-SO₄²⁻ disponível abaixo dos teores críticos. Esse resultado sugere que o teor de S-SO₄²⁻ disponível na camada superficial do solo pode não ser um bom preditor da resposta das culturas à adubação com S. De fato, o teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo depende de vários fatores como; taxa de mineralização da MO, deposição atmosférica de S, quantidade absorvida de S pelas plantas, precipitação, textura do solo, entre outros (Ercoli et al., 2012; Tiecher et al., 2013; Blum et al., 2013; Sutar et al., 2017). Como resultado da interação de todos esses fatores o teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo é modificado durante o ciclo da cultura em vários momentos (variabilidade temporal) o que dificulta a precisão na determinação da necessidade ou não de fertilização (Ercoli et al., 2012). Além disso, a resposta das culturas à adubação com S segue um modelo quadrático ou exponencial, sendo que quando a demanda nutricional da cultura é suprida, o aumento na concentração de S-SO₄²⁻ disponível no solo não resultará em aumento na produtividade de grãos (Lucas et al., 2013).

O teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo nas camadas superficial (48 cultivos) e subsuperficial (34 cultivos) foram calibrados em função da produtividade de grãos das culturas. Os teores críticos para a obtenção de 95% do rendimento máximo das culturas (MEE) foram de 7,5 mg dm⁻³ para a camada de 0,00–0,20 m (Figura 27a) e 8,5 mg dm⁻³ para camada de 0,20–0,40 (Figure 27b). Esses valores críticos são similares aos encontrados por Carmona et al. (2009) para a camada superficial do solo (0,00–0,20 m) em área de arroz irrigado no estado do Rio Grande do Sul: 9 mg dm⁻³. É também similar ao teor crítico estabelecido por Pauletti & Motta (2017) para camada subsuperficial do solo (0,20–0,40 m) para o estado do Paraná (9 mg dm⁻³), e

com os níveis críticos utilizados na discussão desse estudo [viz., 5 e 10 mg dm⁻³ para culturas com baixa e alta demanda por S, respectivamente; CQFS-RS/SC (2016)]. Consistente com estudos prévios (Rheinheimer et al., 2005; Osório Filho et al., 2007), os resultados demonstraram a baixa eficiência em separar as culturas em grupos de alta (e.g., soja, feijão, canola) e baixa (e.g., trigo, milho) demanda por S, conforme realizado pela CQFS-RS/SC (2016). De maneira geral, os cereais apresentam menores teores foliares de S, porém apresentam maior produção de biomassa e grãos o que resulta em taxas de extração de S similares às culturas leguminosas (Alvarez et al., 2007; Sutar et al., 2017).

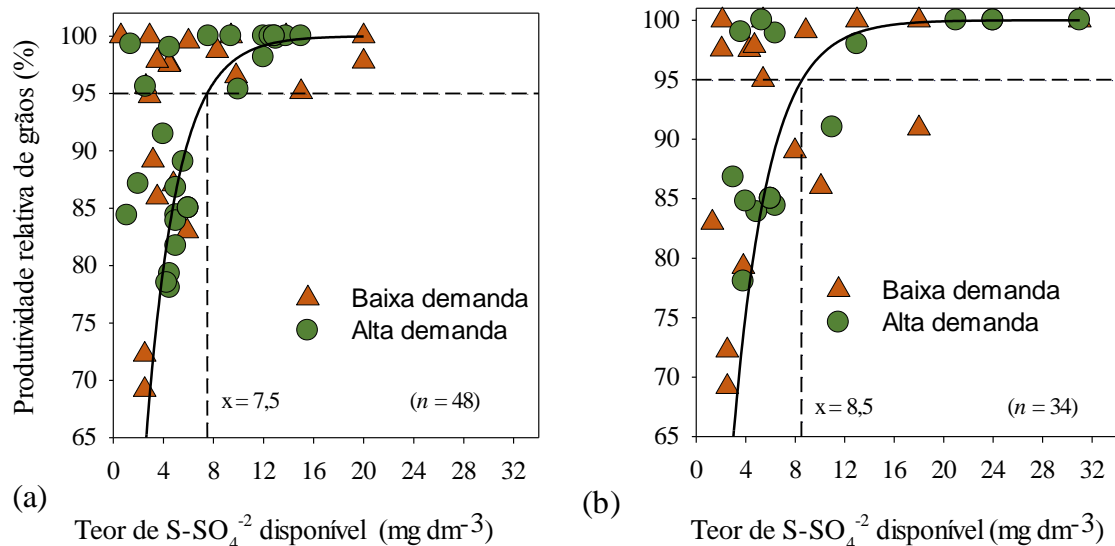


Figura 27. Produtividade relativa de grãos das culturas em função do teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo na camada superficial (0,00–0,20 m) (a) e subsuperficial (0,20–0,40 m) (b) em solos sob sistema plantio direto no Brasil. Considerou-se como culturas de baixa demanda por S o trigo e milho, e de alta demanda por S as culturas Soja, feijão e canola. O número de cultivos em cada figura é apresentado entre parênteses.

Esta revisão sistemática, de estudos avaliando a resposta das culturas à adubação com S em solos apenas em SPD no Brasil, mostrou que tanto as doses de S quanto os níveis críticos utilizados como critério de decisão para a aplicação de S, são similares aos recomendados pelos órgãos oficiais atualmente, os quais foram determinados principalmente sobre sistema de preparo convencional. (Raj et al., 1997; Rein & Sousa, 2004; CQFS-RS/SC, 2016; Pauletti & Motta, 2017). Esses resultados refutaram a nossa hipótese de que culturas cultivadas em solos sob SPD requeriam doses maiores de S do

que as estabelecidas em solo em sistema de preparo convencional. Provavelmente a maior qualidade química, física e biológica dos solos em SPD aumenta a disponibilidade de $S-SO_4^{2-}$ para as plantas, o que possivelmente compensa o maior potencial de lixiviação de $S-SO_4^{2-}$ para camada subsuperficial do solo, devido ao alto pH e maiores teores de nutrientes na camada superficial (Scherer, 2001), além da maior exigência em S pelas plantas devido ao maior potencial produtivo dos híbridos/cultivares atuais (Salvagiotti et al., 2017), e da redução da deposição atmosférica (Vieira-Filho et al., 2015). Essa compensação foi confirmada por Karlen et al. (2013) o qual encontrou maior teor $S-SO_4^{2-}$ disponível em solos sob SPD do que em sistema de preparo convencional na camada superficial (0,00–0,05 m).

3.6 Teor de S no tecido foliar das culturas e a produtividade de grãos

Nossos resultados, mostraram ausência de correlação entre os teores de S foliar e a produtividade de grãos, de cinco culturas diferentes que englobaram um total de 31 cultivos (Figura 28). Alguns estudos têm mostrado aumento do teor de S foliar das culturas pela aplicação de doses de S, porém esse aumento de S no teor foliar não tem se refletido em aumento em produtividade de grãos (Rheinheimer et al., 2005; Frandoloso et al., 2010; Moda et al., 2013). Portanto, a utilização da análise de tecido foliar sozinha para orientar a necessidade de aplicação de S em cultura de grãos requer cuidado, pois as culturas tendem a absorver quantidades de S superiores às suas reais necessidades (consumo de luxo, Ercoli et al., 2011). Além disso, o teor dos nutrientes varia grandemente de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta o que dificulta a calibração de adubações.

Os resultados dessa revisão sistemática confirmam os resultados de Crusciol et al. (2006) para feijão no Brasil, e de Divito et al. (2015) para a soja em 15 experimentos na Argentina. Os últimos autores não encontraram correlação entre teor de S foliar e rendimento relativo da soja, dessa forma, concluíram que a relação N:S e P:S em folhas de soja foram mais eficientes em guiar a necessidade de aplicação de S na cultura. De qualquer forma, a análise do tecido foliar das culturas pode ser uma ferramenta efetiva para

monitorar as necessidades de aplicação de S principalmente em solos com teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível abaixo do nível crítico.

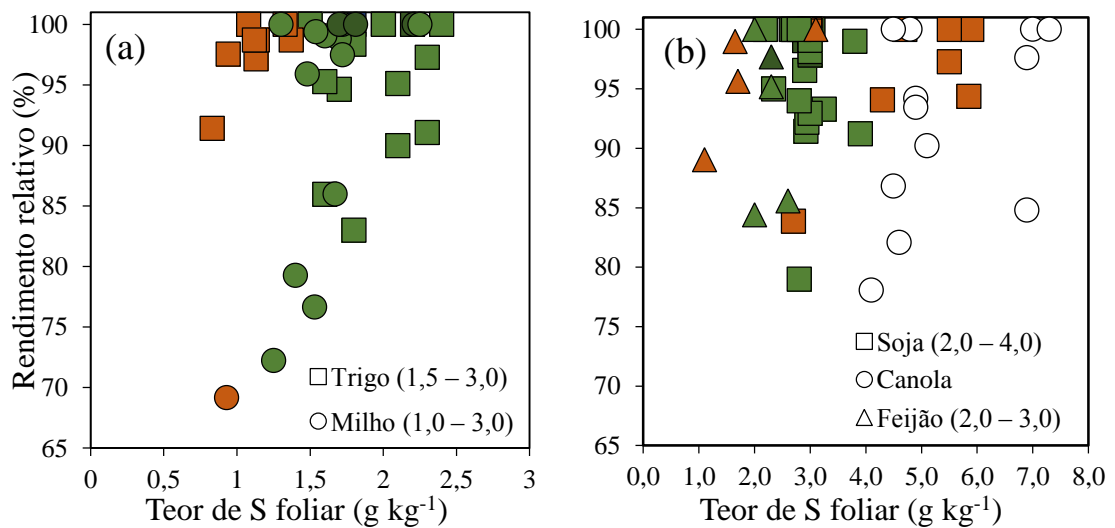


Figura 28. Relação entre o teor de S no tecido foliar e o rendimento relativo de grãos das culturas do trigo e milho (a), e da soja, canola e feijão (b) em solos sob sistema plantio direto. A faixa de teor de S no tecido foliar considerada adequada para cada cultura é apresentada entre parênteses. Símbolos verdes laranjas correspondem a valores dentro e fora da faixa ideal para teor de S no tecido foliar, respectivamente (CQFS RS/SC, 2004; Alvarez et al., 2007; SBCS/NEPAR, 2017). Para a Canola não há disponível faixa de interpretação para a concentração de S no tecido foliar.

3.7 Árvore de regressão da resposta das culturas à adubação com S em solos sob sistema plantio direto no Brasil

Baseado nos resultados da árvore de decisão, quatro fatores de variação (*viz.*, teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível, clima, tipo de cultura, e média de rendimento da cultura) explicaram 63% da resposta das culturas à adubação com S (Figure 29). O teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo foi o principal fator que influenciou a resposta das culturas. O teor crítico de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo na camada superficial (0,00–0,20 m) foi de $7,6\ mg\ dm^{-3}$, o qual foi similar à curva de calibração calculada ($7,5\ mg\ dm^{-3}$; Figure 27a) e apresentada anteriormente neste estudo. Portanto, nenhuma resposta positiva ocorreu em solos com teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível $\geq 7,6\ mg\ dm^{-3}$. Por outro lado, a probabilidade de se obter resposta positiva das culturas pela adubação com S em solos com teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível $< 7,6\ mg\ dm^{-3}$ foi de 50%. Esse resultado confirma a eficiência das recomendações de S para culturas de grãos

existentes para solos sob SPD no Brasil, as quais se baseiam no teor de S-SO₄²⁻ disponível como o único critério de decisão (Lopes et al., 2004; Rein & Sousa, 2004; CQFS-RS/SC, 2016). No entanto, essas recomendações poderiam ser refinadas para solos com deficiência em S (*i.e.*, solos com teor de S-SO₄²⁻ disponível abaixo do nível crítico). O uso de critérios adicionais em solos deficientes pode aumentar a eficiência do manejo da adubação com S.

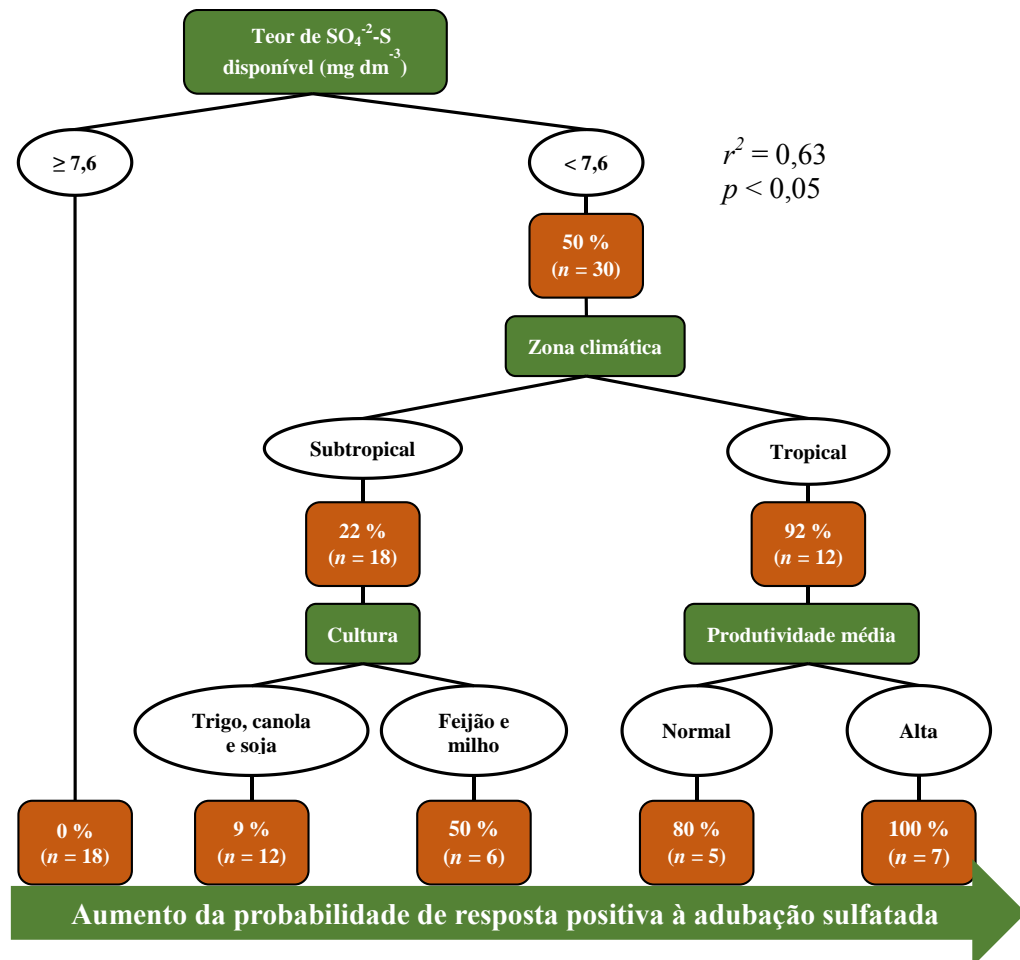


Figura 29. Árvore de regressão da proporção de cultivos de culturas de grãos com resposta positiva à adubação com S em solos conduzidos sob sistema plantio direto no Brasil. O valor de proporção varia de 0 a 100%, aonde 0% significa que nenhum cultivo respondeu positivamente à adubação com S naquele ambiente, enquanto 100% significa que todos os cultivos responderam positivamente. O número total de cultivos em cada subgrupo é apresentado entre parênteses.

Com base em nossos resultados, a zona climática é um fator chave para a resposta das culturas à adubação com S em solos deficientes nesse nutriente (Figura 29). A probabilidade de resposta positiva é muito maior em ambientes tropicais (92% de respostas positivas) do que em subtropicais (22%

de resposta positiva). Em ambientes tropicais o solo normalmente é mais intemperizados, e com isso tende a apresentar baixo teor de MO, especialmente quando não manejado corretamente em relação à rotação de culturas e adição de biomassa (Fageria & Nascente, 2014). Por que a MO é a principal fonte de S nos solos, um baixo teor de MO aumenta a probabilidade de haver deficiência de S nas culturas (Alvarez et al., 2007).

Culturas com alta produtividade média em ambientes tropicais com solos com teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível abaixo do nível crítico responderam positivamente à adubação com S em todos os cultivos ($n = 7$). Esse resultado se deve a que culturas com alta produtividade necessitam de maior disponibilidade de S no solo, aumentando assim a sua probabilidade de responder à adubação com S (Salvagiotti et al., 2017). A probabilidade de resposta positiva ao S em solos subtropicais é baixa (22%), mesmo em solos com teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível abaixo do nível crítico, para as culturas da soja, trigo e canola crescendo nessas condições a probabilidade de resposta positiva foi de apenas 9%. Esse resultado é importante por que a cultura da soja corresponde a aproximadamente 75% de toda a área semeada com culturas de grãos nessa região (safra 2017/18, CONAB, 2018).

3.8 Sugestões para pesquisas futuras com adubação com S em culturas de grãos no Brasil em sistema plantio direto

Estudos com fertilização com S em culturas de grãos no Brasil têm focado em Latossolos nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás, e Mato Grosso do Sul. Para estudos futuros, visando um melhor entendimento da resposta das culturas à adubação com S deve-se conduzi-los em diferentes regiões geográficas como o Cerrado. O Cerrado é a maior região produtora de grãos do Brasil e compreende a maior fronteira agrícola do mundo, situada na junção dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí, e Bahia, o que denominamos comumente como “MATOPIBA”.

O efeito de fontes de S na produtividade das culturas precisa ser melhor investigado afim de esclarecer alguns resultados contrastantes (Broch et al., 2011; Fano, 2015; Fiorini et al., 2016). Além disso, o potencial da adubação com S em melhorar a qualidade de grãos das culturas em especial o

trigo precisa ser mais bem explorado, assim como, o efeito da aplicação parcelada de S a fim de se obter uma maior sincronia entre a disponibilidade de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo e às necessidades das culturas, reduzindo com isso o potencial de lixiviação (Ercoli et al., 2011; Fano, 2015). O mapeamento da quantidade de S adicionado aos solos via deposição atmosférica poderia ser muito útil para o cálculo de balanço de S no solo e com isso refinar as recomendações com S para as culturas, assim como, identificar regiões em que se tem maior probabilidade de se obter resposta positiva das culturas pela adubação com S. Estudos de longa duração da resposta das culturas à adubação com S em solos em SPD são necessários para o estabelecimento de um manejo mais acurado da adubação com S em solos tropicais e subtropicais do Brasil e em outras regiões do mundo.

4 Conclusões

A adubação com S aumentou em média 16% a produtividade de grãos das culturas em 31% dos cultivos avaliados em solos sob SPD no Brasil. Feijão, milho e soja são as culturas de grãos mais responsivas à adubação com S enquanto a canola e o trigo as com menor probabilidade de resposta positiva. Nos cultivos com resposta positiva, 26 kg ha^{-1} de S foi a dose de máxima eficiência econômica (*i.e.*, dose necessária para obtenção de $\geq 95\%$ do rendimento máximo possível). Os níveis críticos de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo na superfície (0,00–0,20 m) e em subsuperfície (0,20–0,40 m) foram de $7,5$ ($n = 51$) e $8,5 \text{ mg dm}^{-3}$ ($n = 39$), respectivamente.

O principal fator que condiciona a resposta das culturas de grãos à aplicação de S em solos sob SPD no Brasil é o teor de $S-SO_4^{2-}$ disponível, onde 50% ($n = 30$) dos cultivos apresentaram aumento na produtividade de grãos pela adubação quando os teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível estavam abaixo do nível crítico (*i.e.*, $7,5 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0,00–0,20 m). De maneira geral, as recomendações oficiais estabelecidas para solos em sistema de preparo convencional são eficientes para culturas de grãos cultivadas em solos sob SPD. De fato, os níveis críticos de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo e as doses de S recomendadas foram consistentes com os valores encontrados nessa revisão sistemática que contemplou apenas estudos conduzidos em SPD. No

entanto, as recomendações existentes podem ser melhoradas a partir da adição de novos critérios de decisão. Dessa forma, resposta positiva das culturas em solos com deficiência de S ocorre mais frequentemente em ambientes tropicais (92% dos cultivos) do que em subtropicais (22% dos cultivos). Finalmente, a adubação com S deve ser priorizada em solos sob SPD com teor de $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ disponível abaixo de $7,5 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0,00–0,20 m, especialmente em zona climática tropical. Além disso, recomendações regionais devem considerar a espécie de cultivo e a expectativa de rendimento afim de facilitar a obtenção de um manejo mais sustentável da adubação com S e aumentar a produtividade das culturas de grãos no Brasil.

CAPÍTULO IV – DEPOSIÇÃO ATMOSFÉRICA DE ENXOFRE, PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E TEORES DE SULFATO EM SOLO SUBMETIDO À APLICAÇÕES ANUAIS DE GESSO E S-ELEMENTAR

1 INTRODUÇÃO

O S é um dos macronutrientes essenciais, constituinte de aminoácidos e proteínas, vital para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Aula et al., 2019). Apesar de sua importância, o S é o macronutriente menos estudado (Kihara et al., 2017; Salvagiotti et al., 2017), pois historicamente não era comum a detecção de ocorrência de deficiência desse nutriente nos solos do Brasil. A principal fonte de enxofre no solo é a matéria orgânica (Sutar et al., 2017), a qual libera S para a solução do solo, quando da sua decomposição na forma de SO_4^{2-} , podendo este ser absorvido pelas plantas, lixiviado, reduzido ou reassimilado pela microbiota (Ercoli et al., 2012). Solos com alto teor de matéria orgânica, conseqüentemente, liberam altas quantidades de S-SO_4^{2-} na solução do solo. Contudo, em proporção semelhante grande quantidade de S-SO_4^{2-} é imobilizado pelo microorganismos para a decomposição dos resíduos orgânicos (Alvarez et al., 2007).

A deposição atmosférica de S através da precipitação é outra importante fonte de S para o solo, principalmente, em áreas próximas a grandes centros industriais e ao oceano (Tiecher et al., 2013; Vieira-Filho et al., 2015). Contudo, devido às novas tecnologias utilizadas nas indústrias e às normas de fiscalização mais rígidas dos governos, a deposição atmosférica média de S tem reduzido significativamente nas últimas décadas tanto no Brasil quanto a nível mundial (Divito et al., 2015; Vieira-Filho et al., 2015). Dessa forma, a probabilidade de resposta positiva das culturas à adubação sulfatada tem aumentado, tanto pela redução da deposição atmosférica de S,

quanto pelo significativo aumento da produtividade das culturas (Salvagiotti et al., 2017; Aula et al., 2019; Pias et al., 2019).

A aplicação de fertilizantes minerais com S é a principal forma de aumentar as reservas de S no solo e com isso suplementar as necessidades das plantas. Os fertilizantes com S mais comuns são o sulfato de amônio (22–24% S), o superfosfato simples (10–12% S), o sulfato de potássio (15–17% S) e o gesso agrícola (13% S). Contudo, nos últimos anos tem se dado preferência para o uso de fertilizantes concentrados (ureia e superfosfato triplo) que não contém S em suas formulações, devido ao menor custo por unidade de nutriente NPK (Rheinheimer et al., 2005; Fiorini et al., 2016).

Todas essas fontes citadas anteriormente disponibilizam o S logo após a sua aplicação já na forma de SO_4^{2-} , que é a forma absorvida pelas plantas (Ercoli et al., 2012). Um inconveniente da disponibilização imediata do S- SO_4^{2-} no solo é o aumento da probabilidade de lixiviação do nutriente devido à sua alta mobilidade no perfil do solo (Ercoli et al., 2012), principalmente em solos arenosos, e com altos valores de pH e de capacidade de troca de cátions (CTC) (Dalla Nora e Amado, 2013; Tiecher et al., 2019).

Recentemente tem se popularizado a aplicação do S-elementar nas lavouras, o qual após ser aplicado necessita ser oxidado por microorganismos do solo para a forma SO_4^{2-} (Horowitz & Meurer, 2006). Assim, o S-elementar tem sido comercializado como um fertilizante de liberação lenta podendo reduzir as perdas por lixiviação, principalmente em ambientes com alta precipitação (Degryse et al. 2018). Estudos têm mostrado que a oxidação do S-elementar ocorre em todos os solos brasileiros, porém as taxas de oxidação variam de acordo com características do solo como aeração, temperatura, teor de matéria orgânica, acidez e biomassa microbiana (Horowitz & Meurer, 2006; 2007).

Vários estudos têm avaliado o efeito da aplicação de diferentes fontes de S na produtividade das culturas em SPD, tanto fontes com S- SO_4^{2-} prontamente disponível e/ou com S-elementar que precisa ser oxidado (Broch et al., 2011; Fano, 2015; Fiorini et al., 2016; Lopes et al., 2017). Contudo, os resultados são bastante contrastantes, não sendo possível definir ambientes em que seja mais eficiente utilizar uma ou outra fonte (Pias et al., 2019). Além disso, a produtividade de todas as grandes culturas tem aumentado

significativamente nas últimas décadas (CONAB, 2018). Dessa forma, em área com expectativa de alto rendimento ocorre conseqüentemente uma maior absorção e exportação de nutrientes pelas plantas, necessitando que o solo apresente teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível superiores aos necessários para áreas com produtividades de média a baixa (Salvagiotti et al., 2017).

Uma das limitações dos estudos com adubação sulfatada disponíveis na literatura é que normalmente esses são de curta duração. No presente estudo, tem-se a oportunidade única de visualizar a dinâmica do $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo e o efeito de aplicações anuais de S na produtividade de grãos de 27 cultivos, em três locais com tempo variando entre 4 a 8 anos, para buscar um melhor esclarecimento sobre o assunto. A hipótese é de que em locais com alta produtividade das culturas e com baixa deposição atmosférica de S a adubação sulfatada mesmo em solos com teores de $S-SO_4^{2-}$ acima do nível crítico podem incrementar o rendimento das culturas. Além disso, o uso de fontes de S com diferentes taxas de disponibilização do $S-SO_4^{2-}$ podem influenciar a sua dinâmica no perfil do solo. O objetivo desse estudo foi avaliar a deposição atmosférica de S, a produtividade de grãos das culturas e a dinâmica do $S-SO_4^{2-}$ no perfil do solo ao longo dos anos após aplicações anuais de gesso e S-elementar em SPD.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição dos locais de estudo e tratamentos

Os experimentos de campo foram conduzidos na região centro-sul do Paraná, nos municípios de Goioxim, com implantação no ano agrícola 2012/2013, Candói no inverno de 2014, e Reserva do Iguaçu no ano agrícola 2013/2014, sendo que nos três locais conduziram-se os experimentos até a safra 2018/2019. O delineamento experimental utilizado nos estudos foi de blocos casualizados, onde avaliou-se o efeito da aplicação de 75 kg ha^{-1} de S na forma de S-elementar (95% de S) e gesso agrícola (15% de S), além de um tratamento controle (ausência de aplicação de S), com quatro repetições. As aplicações dos fertilizantes contendo S foram realizadas anualmente sempre na entre safra de outono, sendo as aplicações realizadas de forma manual na

superfície do solo. As parcelas apresentavam dimensão de 8 x 10 m (80 m²) em Goioxim e Candói e 9,6 x 7 m (67,2 m²) em Reserva do Iguaçu.

O clima da região dos locais de estudo é subtropical úmido, do tipo Cfb (Köppen) com precipitação de aproximadamente 2000 mm anuais e temperaturas médias de 17 °C. Os solos foram todos classificados como Latossolo Bruno, segundo classificação de Santos et al. (2013). As áreas estavam sendo conduzidos em SPD há mais de 10 anos e seguiam sistemas de rotação de culturas com soja e milho no verão e trigo e cevada no inverno. Os atributos químicos dos solos no momento da implantação dos experimentos são apresentados na Tabela 7. Observa-se que os solos nos três locais apresentavam, de maneira geral, alta fertilidade química, níveis de acidez adequados ao desenvolvimento das culturas e teores de S-SO₄²⁻ acima dos níveis críticos, tanto em superfície (>3 mg dm⁻³) quanto em subsuperfície (>9 mg dm⁻³) (Pauletti & Motta, 2017).

Tabela 7. Atributos químicos dos solos antes da instalação dos experimentos.

Prof. m	Argila -----%	MO ⁽¹⁾ -----%	V% ⁽²⁾ -----	pH H ₂ O	P ⁽³⁾ -----mg/dm ³	K ⁺ -----	S-SO ₄ ²⁻ -----	Al ³⁺ -----cmol _c /dm ³	Ca ²⁺ -----	Mg ²⁺ -----
-----Goioxim-----										
0,00–0,10	37,8	6,0	69,0	5,8	7,7	164,2	16,0	0,0	7,4	3,2
0,10–0,20	46,1	5,2	55,0	5,5	3,9	89,9	15,0	0,0	4,4	2,1
0,20–0,40	51,4	4,0	41,0	5,5	2,2	50,8	18,0	0,0	2,4	1,3
0,40–0,60	54,1	2,9	47,0	5,6	2,4	27,4	17,0	0,0	1,7	1,0
-----Candói-----										
0,00–0,10	26,2	5,5	82,0	5,4	10,0	161,0	13,0	0,2	9,3	5,5
0,10–0,20	38,4	4,5	55,0	5,5	4,9	108,0	18,0	0,0	4,8	3,6
-----Reserva do Iguaçu-----										
0,00–0,10	54,6	5,6	80,0	5,8	16,0	16,0	13,8	0,0	10,6	5,4
0,10–0,20	59,6	4,6	64,0	5,3	10,5	10,5	15,0	0,1	7,3	4,1

⁽¹⁾Matéria orgânica, ⁽²⁾Saturação por bases, ⁽³⁾Mehlich-1.

2.2 Condução dos cultivos e variáveis analisadas

Ao todo, nos três locais de estudo, avaliou-se a resposta de 27 cultivos à adubação sulfatada, sendo: 11 de soja, 6 de milho, 4 de cevada, 4 de trigo e 2 de feijão. As cultivares/híbridos, adubação, espaçamento e densidade utilizadas em cada cultivo são apresentadas na Tabela 8. Em cada local, os tratamentos fitossanitários foram realizados de acordo com as recomendações técnicas vigentes para cada cultura, sendo o mesmo para todos os

tratamentos. A produtividade de grãos foi determinada pela colheita de 32 m² (3,2 x 10 m) para soja e feijão, 16 m² para milho (1,6 x 10 m) e 34 m² (3,4 x 10 m) para os cereais de inverno de cada parcela, utilizando-se colhedoras especializadas para colheita de parcelas. A umidade dos grãos foi determinada em laboratório e os dados de produtividade ajustados para 13%.

Tabela 8. Informações agrônômicas dos cultivos realizados avaliando o efeito da adubação sulfatada em Goioxim, Reserva do Iguaçu e Candói durante os anos de 2012/13 a 2018/19, no Centro-Sul do PR.

Cultura/ano	Densidade de plantas (plantas m ⁻²)	Espaçamento (m)	Adubação na semeadura (kg ha ⁻¹)			N em cobertura
			N	P	K	
-----Goioxim-----						
Milho (2012/2013)	7,5	0,80	37,0	91,0	92,5	150,0
Feijão (2013)	25,0	0,50	20,0	50,0	50,0	60,0
Trigo (2013)	300,0	0,17	36,0	100,0	96,0	45,0
Soja (2013/2014)	35,0	0,45	0,0	0,0	0,0	0,0
Cevada (2014)	280,0	0,17	36,0	100,0	96,0	45,0
Soja (2014/2015)	22,0	0,45	0,0	0,0	0,0	0,0
Milho (2015/2016)	7,5	0,80	40,0	120,0	116,0	160,0
Trigo (2016)	330,0	0,17	28,0	105,0	70,0	45,0
Soja (2016/2017)	22,0	0,45	0,0	0,0	58,0	0,0
Cevada (2017)	280,0	0,17	25,0	112,5	58,0	58,0
Soja (2017/2018)	22,0	0,45	0,0	61,5	58,0	0,0
Milho (2018/2019)	7,5	0,80	40,0	120,0	116,0	160,0
Feijão (2019)	25,0	0,50	20,0	50,0	50,0	60,0
-----Reserva do Iguaçu-----						
Milho (2013/2014)	7,0	0,80	30,0	120,0	80,0	150,0
Cevada (2014)	280,0	0,17	36,0	100,0	96,0	40,0
Soja (2014/2015)	40,0	0,45	0,0	75,0	75,0	0,0
Trigo (2015)	400,0	0,17	28,0	105,0	70,0	45,0
Soja (2015/2016)	25,0	0,45	0,0	62,5	62,5	0,0
Milho (2016/2017)	7,0	0,80	54,0	140,0	76,5	160,0
Soja (2017/2018)	25,0	0,45	0,0	90,0	0,0	0,0
-----Candói-----						
Cevada (2014)	280,0	0,17	36,0	100,0	96,0	45,0
Soja (2014/2015)	22,0	0,40	0,0	62,5	62,5	0,0
Soja (2015/2016)	22,0	0,40	0,0	37,5	37,5	0,0
Trigo (2016)	300,0	0,17	28,0	105,0	70,0	45,0
Soja (2016/2017)	22,0	0,40	0,0	62,5	62,5	0,0
Milho (2017/2018)	7,0	0,40	36,0	100,0	100,0	150,0
Soja (2018/2019)	22,0	0,40	0,0	62,5	62,5	0,0

Para a avaliação conjunta dos diferentes cultivos, determinou-se a produtividade relativa de grãos (% da produtividade máxima) de cada parcela em relação à parcela com máxima produtividade em cada cultivo, de acordo com a Equação 1. Na sequência, calcularam-se as médias de produtividade relativa de cada tratamento de todos os cultivos em cada experimento (Goioxim, Reserva do Iguaçu e Candói) e englobando os três locais de estudo.

$$\text{Produtividade relativa (\%)} = \frac{\text{Produtividade de grãos da parcela (Mg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Parcela com a maior produtividade (Mg ha}^{-1}\text{)}} \times 100 \quad \text{Eq.1}$$

Os teores de S-SO₄²⁻ das camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m do solo foram avaliados anualmente sempre após a colheita da cultura de verão e antes da nova aplicação de S, durante quatro anos em Reserva do Iguaçu, cinco anos em Candói e sete anos em Goioxim. As amostras estratificadas foram coletadas de forma manual com auxílio de trado calador, procedendo-se a coleta de nove subamostras por parcela para compor uma amostra composta. O teor de S-SO₄²⁻ do solo foi determinado em laboratório por meio da extração do S-SO₄²⁻ com fosfato de cálcio Ca(PO₄)₂ na concentração de 0,01 mol L⁻¹, e da quantificação por ICP (CQFS RS/SC, 2016).

Para a determinação da deposição atmosférica de S foram instalados nos três locais de estudo amostradores do tipo “bulk”, os quais são utilizados para a coleta e armazenamento da água da chuva. Semanalmente, durante o período de outubro de 2017 a outubro de 2018 os amostradores eram revisados, determinando-se a precipitação ocorrida no período e a coleta de amostras de água da chuva (30 mL) as quais foram congeladas até o seu encaminhamento ao laboratório. Para a determinação do SO₄²⁻ das alíquotas inicialmente realizou-se a filtração em membrana de celulose de 0,22 μm, e na sequência a determinação foi realizada por ICP.

2.3 Análise estatística

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos à análise de variância pelo teste de F a 5% de significância, sendo as médias do efeito das fontes de S comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5%, e o efeito dos anos após aplicação através de regressões polinomiais ao nível de 5%. As análises estatísticas foram realizadas com o software SISVAR (Ferreira et al., 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Deposição atmosférica de $S-SO_4^{2-}$ nos locais dos experimentos

Os resultados obtidos demonstram que houve pouca variação na deposição atmosférica de S entre os locais estudados, o que se deve provavelmente à pequena distância entre eles (< 100 km), variando entre 8,9 e 10,4 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de S (Figura 30). Pode-se observar uma relação positiva entre o volume de chuva e a deposição atmosférica de S. Esses valores de deposição atmosférica de S explicam em parte, a ausência de resposta positiva à adubação com S observada por em vários estudos mesmo em solos deficientes (Rheinheimer et al., 2005; Frandoloso et al., 2010; Castañon et al., 2011). Como exemplo, pode-se prever que valores de deposição atmosférica de S de 10 kg ha⁻¹ ano⁻¹ são suficientes para repor a exportação de S realizada pela produção de 3,7 Mg ha⁻¹ de grãos de soja (Souza et al., 2009) ou 10 Mg ha⁻¹ de grãos de milho (Duarte et al., 2018).

Apesar da deposição atmosférica de S estar reduzindo ao longo dos anos no Brasil e no mundo, ela ainda é significativa e importante para suplementar as quantidades de S disponibilizadas pelo solo para a nutrição das plantas. Em São Paulo, por exemplo, região altamente industrializada, a deposição anual em 2014 foi de 14 kg S ha⁻¹ ano⁻¹ (Vieira-Filho et al., 2015); já em Santa Maria cidade do interior do RS a deposição foi de 4,5 kg S ha⁻¹ ano⁻¹ entre os anos de 2007–2009 (Tiecher et al., 2013). No Brasil tem-se escassez de dados de deposição atmosférica de S em áreas agrícolas, o que prejudica as recomendações de S, e principalmente a previsão de ocorrência ou não de resposta positiva à adubação com S (Pias et al., 2019).

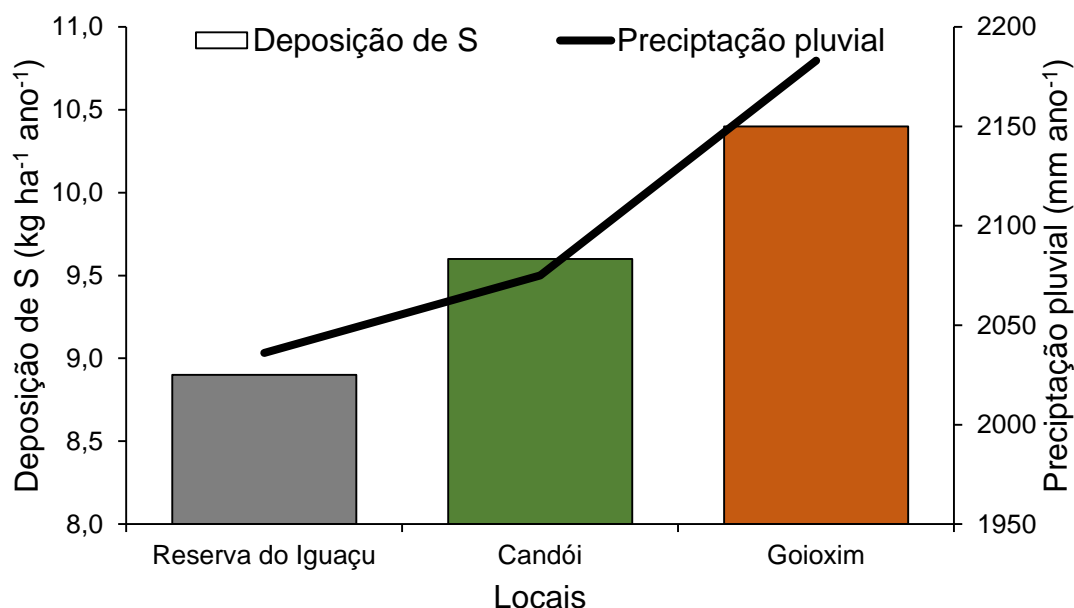


Figura 30. Deposição atmosférica de enxofre e precipitação pluvial entre o período de outubro de 2017 a outubro de 2018, nos três locais de estudo.

3.2 Teores de S-SO₄²⁻ disponível no solo ao longo de 5 anos de aplicações anuais de S em Candói

No experimento em Candói, observa-se que os teores de S-SO₄²⁻ disponível da camada superficial (0,00–0,10 m) do solo não sofreram modificações ao longo dos 5 anos de estudo, mesmo com aplicações anuais fertilizantes com S (Figura 31a). Porém, o solo que recebeu o S-elementar manteve os teores médios de S-SO₄²⁻ disponível (24,87 mg dm⁻³) bem superiores aos demais tratamentos (11,73 e 13,87 mg dm⁻³ para os tratamentos sem aplicação e com aplicação via gesso, respectivamente) devendo-se ressaltar, no entanto, que houve diferença estatística entre os tratamentos apenas no quarto ano de estudo. A aplicação de gesso não aumentou os teores superficiais de S-SO₄²⁻ disponível em relação ao tratamento controle.

Mesmo o tratamento controle que não recebeu nenhuma aplicação de S ao longo dos cinco anos de experimento, manteve os teores de S-SO₄²⁻ disponível bem acima do nível crítico (3 mg dm⁻³, Pauletti & Motta, 2017) para o bom desenvolvimento das culturas na camada superficial. Esse resultado possivelmente está relacionado com a capacidade de aporte de S da matéria

orgânica que é a principal fonte desse nutriente no solo, além da deposição atmosférica de S. Esse maior teor de S-SO₄²⁻ disponível no solo que recebeu o S-elementar, em relação ao uso do gesso, pode estar relacionado com a sua menor propensão à perda por lixiviação (liberação lenta) já que é necessário que o mesmo seja inicialmente oxidado por microrganismos para se transformar em SO₄²⁻, o qual apresenta maior mobilidade no perfil do solo (Ercoli et al., 2012). A taxa de oxidação do S-elementar depende de uma série de fatores como temperatura, umidade, teor de matéria orgânica, teor de S-SO₄²⁻, valor de pH, entre outros (Horowitz & Meurer, 2007).

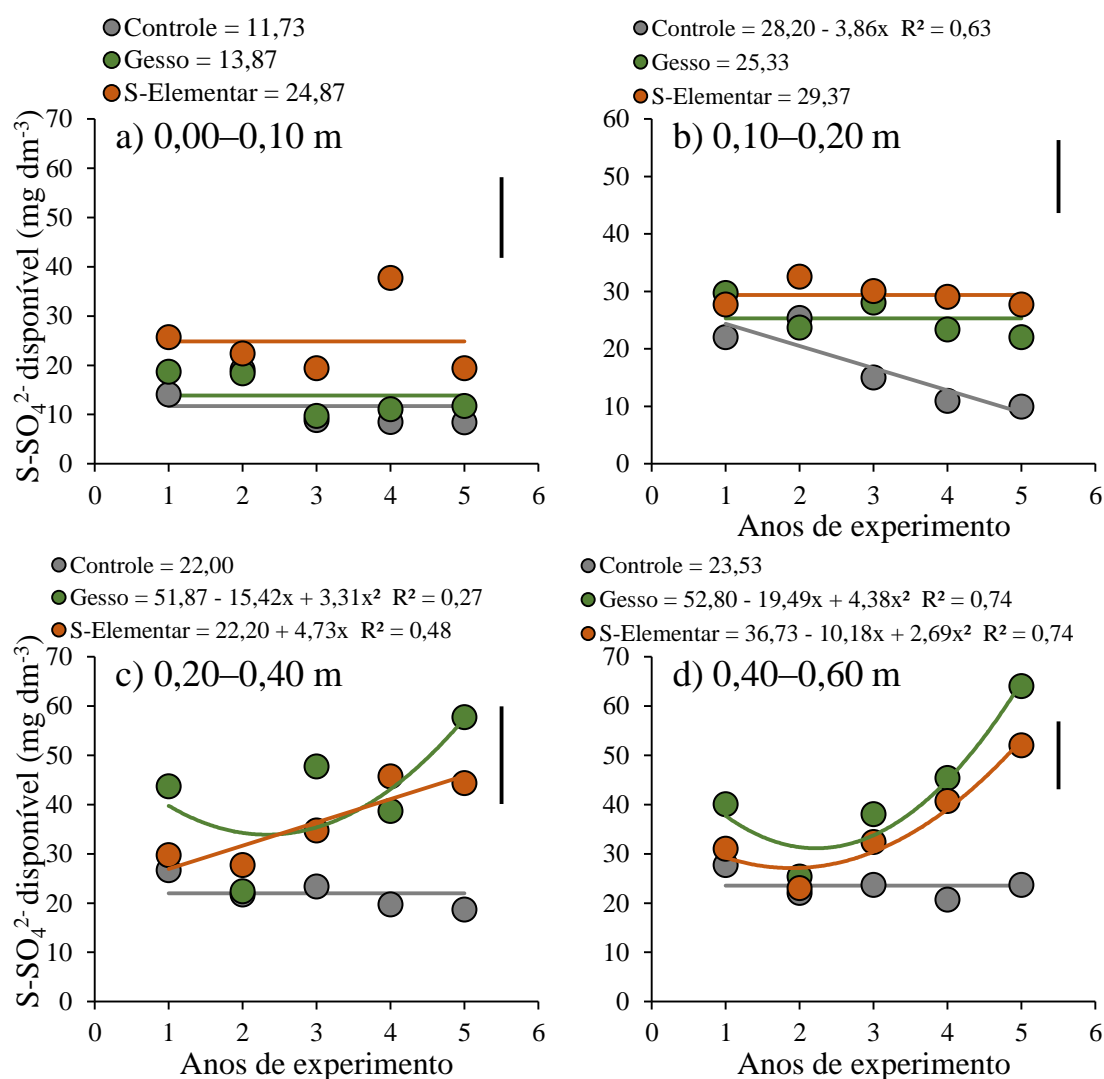


Figura 31. Teores de S-SO₄²⁻ disponível nas camadas de 0,00–0,10 (a), 0,10–0,20 (b), 0,20–0,40 (c) e 0,40–0,60 m (d) do solo durante cinco anos de aplicações anuais de 75 kg ha⁻¹ de S utilizando como fonte o gesso e S-elementar em Candói, PR. As linhas pretas verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos, pelo teste de Tukey ao nível de 5%

Na camada de 0,10–0,20 m, os valores médios de S-SO₄²⁻ disponível no solo dos tratamentos que receberam adubação com S também não variaram ao longo dos anos de estudo e nem diferiram entre as fontes utilizadas, permanecendo entre 25 e 30 mg dm⁻³ em média (Figura 31b). Porém, o teor de S-SO₄²⁻ disponível do tratamento controle reduziu linearmente, passando de 22 mg dm⁻³ no primeiro ano de estudo para 9,93 mg dm⁻³ no quinto ano, o que representa uma redução de 55% do valor. Essa redução dos teores de S-SO₄²⁻ está possivelmente relacionada com o menor fornecimento de S pela matéria orgânica nessa camada em relação à superficial e à grande absorção de S pelo sistema radicular das plantas e consequente exportação do nutriente via grãos, a qual varia entre 1 a 2,7 kg de S Mg⁻¹ (Sousa et al., 2009; Duarte et al., 2018). Independente da fonte utilizada, os teores de S-SO₄²⁻ disponível do solo diferiram do controle a partir do terceiro ano de estudo. Resultados similares foram observados por Rheinheimer et al. (2005) em um solo arenoso com baixo teor de MO, onde avaliando o efeito de doses de até 60 kg ha⁻¹, observaram que mesmo nas maiores doses aplicadas os teores de S-SO₄²⁻ disponível no solo apresentaram pouco incremento ao longo do tempo, o que segundo os autores se deve à baixa capacidade de adsorção de S-SO₄²⁻ ao solo estudado, entre outros fatores. Na região de realização do presente estudo, a alta média anual de precipitação que é de aproximadamente 2000 mm também pode ter favorecido a lixiviação do S-SO₄²⁻ para camadas subsuperficiais (Figura 30).

Nas camadas subsuperficiais (abaixo dos 0,20 m), observou-se que as aplicações anuais tanto do S-elementar quanto do gesso apresentaram tendência de aumentar os valores de S-SO₄²⁻ disponível do solo, não havendo diferença estatística entre as fontes (Figuras 31c e 31d). Esse resultado demonstra que quando o solo apresenta teores de S-SO₄²⁻ disponível acima do nível crítico na camada superficial do solo, a aplicação anual sequencial de S independente de fonte irá aumentar os teores de S-SO₄²⁻ disponível apenas em camadas subsuperficiais. Esse resultado se deve à maior capacidade de adsorção de S-SO₄²⁻ em subsuperfície, devido ao menor pH e teores de fósforo e maior concentração de cargas positivas do solo (alta CTA) (Alvarez et al., 2007). No tratamento controle os teores de S-SO₄²⁻ disponível no solo

mantiveram-se inalterados estatisticamente ao longo dos anos de estudo em subsuperfície, sendo que houve diferença entre os tratamentos que receberam S e o controle apenas a partir do quarto ano estudado.

3.3 Teores de S-SO₄²⁻ disponível no solo ao longo de 4 anos de aplicações anuais de S em Reserva do Iguaçu

No experimento em Reserva do Iguaçu, independente do tratamento, observou-se a ocorrência de redução dos teores de S-SO₄²⁻ disponível do solo nos dois primeiros anos de estudo (Figura 32), sendo que esse resultado deve estar relacionado ao histórico de manejo que vinha sendo utilizado em anos anteriores ao início do experimento, com o uso de altas doses de superfosfato simples para correção dos teores de fósforo, o qual contém 10% de S em sua composição.

Nas camadas superficiais do solo (0,00–0,10 e 0,10–0,20 m) o uso do S-elementar aumentou os teores de S-SO₄²⁻ disponível do solo em relação ao controle a partir do terceiro ano de estudo, enquanto o uso do gesso não se diferenciou do controle, com exceção do primeiro ano de estudo na camada de 0,00–0,10 m, caracterizando a lixiviação desse nutriente para camadas subsuperficiais, resultado semelhante ao observado em Candói (Figura 32a e 32b). A maior capacidade de aumentar os teores de S-SO₄²⁻ disponível do solo com as aplicações anuais de S em Reserva do Iguaçu em relação à Candói pode estar relacionada aos maiores teores de argila (óxidos e hidróxidos de Fe e Al) que são de 57% em Reserva do Iguaçu, enquanto em Candói o teor médio de argila é de 32%. Solos com maior teor de argila apresentam mais sítios de adsorção para o S-SO₄²⁻, resultando em uma menor propensão a perda de S-SO₄²⁻ por lixiviação.

Nas camadas subsuperficiais (0,20–0,40 e 0,40–0,60 m) a dinâmica dos teores de S-SO₄²⁻ disponível do solo foram semelhantes, sendo que tanto o uso do gesso agrícola quanto do S-elementar aumentou significativamente os seus valores a partir do terceiro ano de estudo, diferenciando-se estatisticamente do controle (Figura 32c e 32d). Já no tratamento controle, houve redução dos teores de S-SO₄²⁻ disponível ao longo dos anos até valores próximos ao nível crítico que é de 9 mg dm⁻³ para a camada de 0,20–0,40 m

(Pauletti & Motta, 2017). Esse resultado era esperado devido à lixiviação do nutriente para camadas mais profundas e ao esgotamento do solo pela exportação do S sem a realização de reposição, já que não houve nenhuma aplicação de fertilizante com S nesse tratamento ao longo dos quatro anos de condução do experimento.

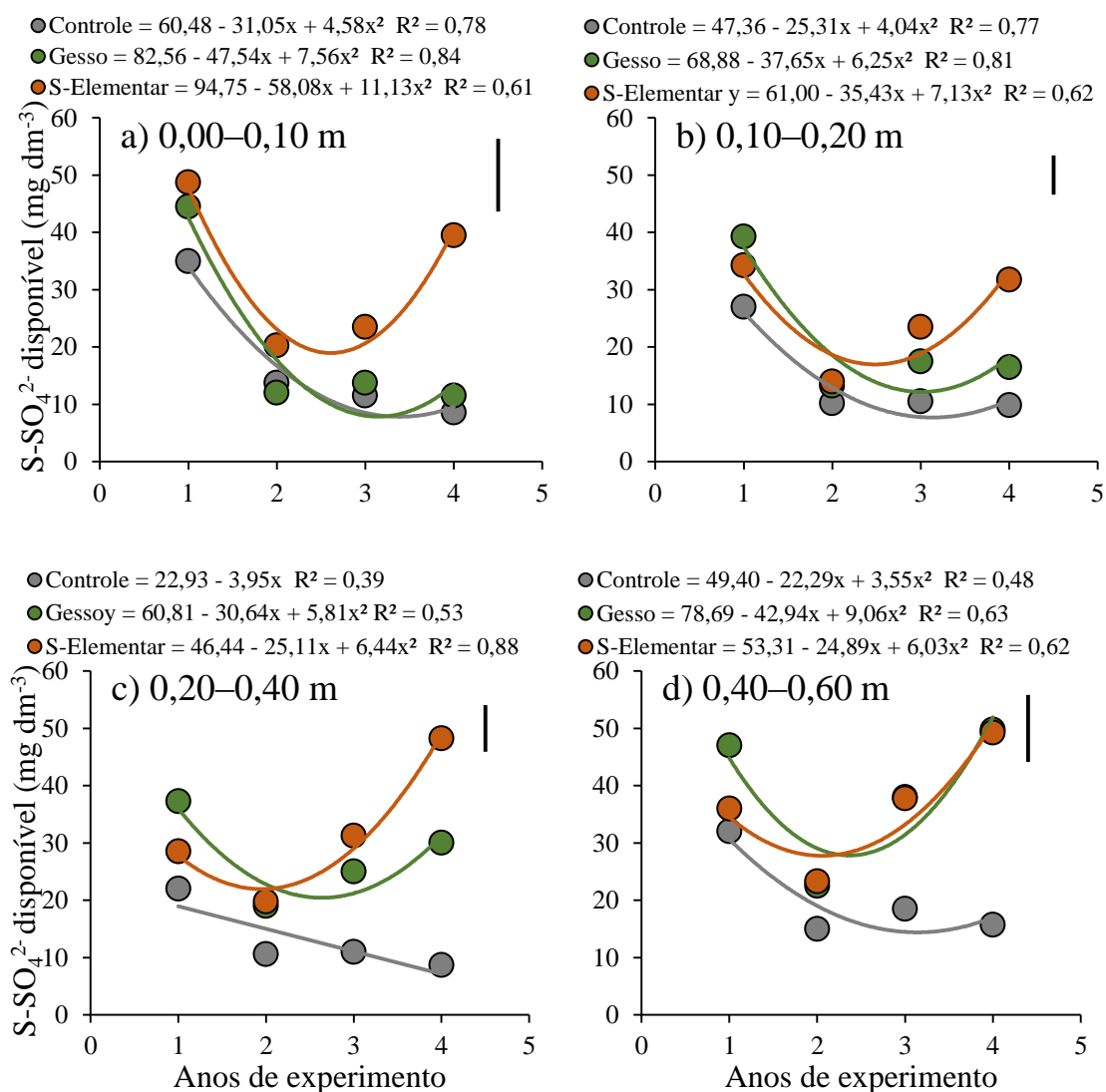


Figura 32. Teores de S-SO₄²⁻ disponível nas camadas de 0,00–0,10 (a), 0,10–0,20 (b), 0,20–0,40 (c) e 0,40–0,60 m (d) do solo durante quatro anos de aplicações anuais de 75 kg ha⁻¹ de S utilizando como fonte o gesso e S-elementar em Reserva do Iguaçu, PR. As linhas pretas verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos, pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

3.4 Teores de S-SO₄²⁻ disponível no solo ao longo de 7 anos de aplicações anuais de S em Goioxim

No experimento em Goioxim, que foi o de maior duração com sete aplicações anuais de S, observa-se que na camada superficial (0,00–0,10 m) do solo a aplicação de S via gesso não diferenciou os teores de S-SO_4^{2-} disponível em relação ao controle (Figura 33a). Por outro lado, a aplicação do S-elementar foi efetiva em manter estável os teores de S-SO_4^{2-} da camada superficial do solo, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos a partir do quarto ano de estudo. Os teores de S-SO_4^{2-} disponível do solo que recebeu gesso e do controle apresentaram uma redução de seus valores nos anos iniciais de experimento (até 3º ano) havendo na sequencia uma estabilização. Já o solo com que recebeu S-Elementar manteve os teores de S-SO_4^{2-} estáveis durante os 7 anos, sendo os valores médios de aproximadamente 35 mg dm^{-3} .

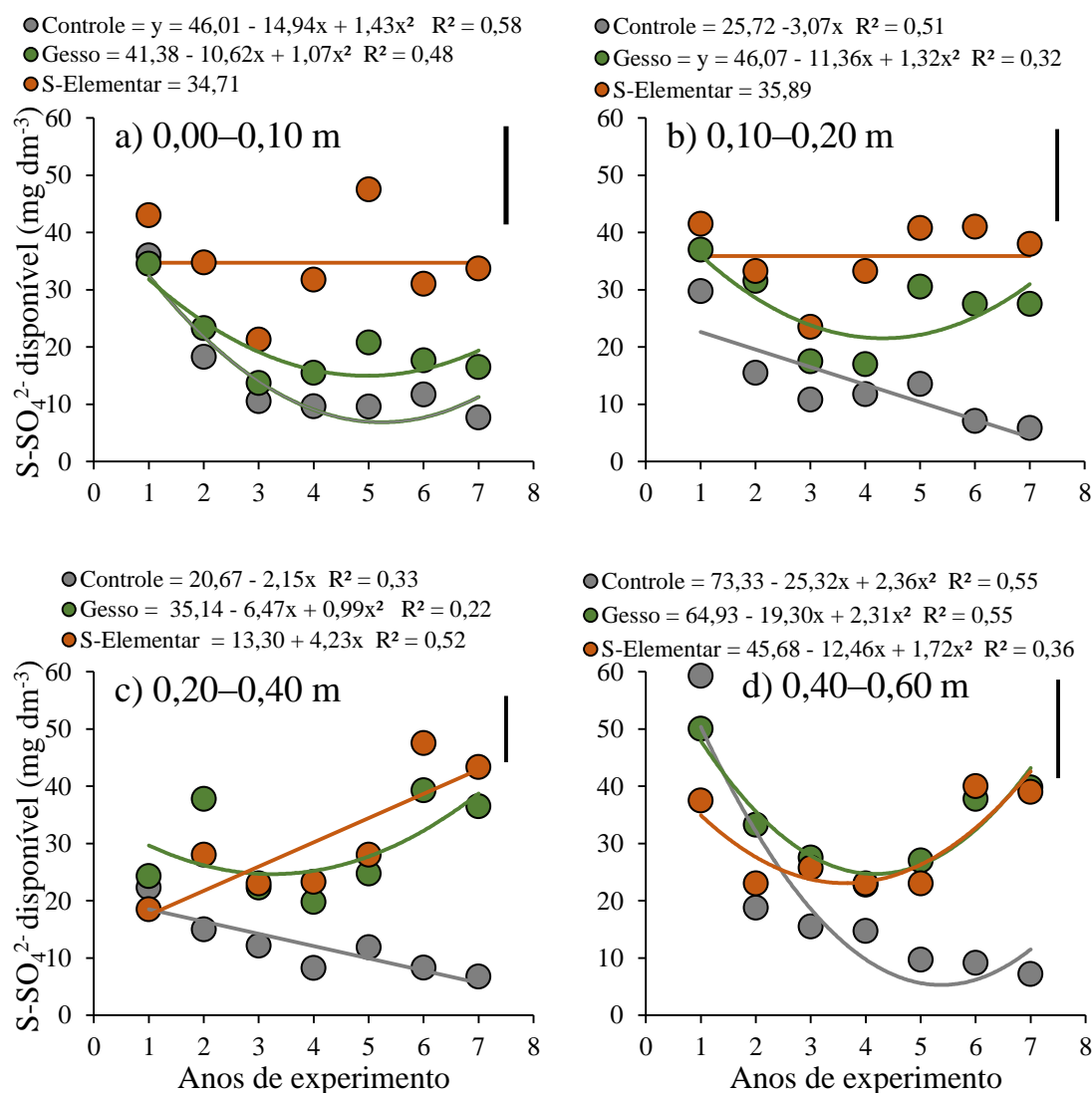


Figura 33. Teores de SO_4^{2-} disponível nas camadas de 0,00–0,10 (a), 0,10–0,20 (b), 0,20–0,40 (c) e 0,40–0,60 m (d) do solo durante sete anos de aplicações anuais de 75 kg ha^{-1} de S utilizando como

fonte gesso e S-elementar em Goioxim, PR. As linhas pretas verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos, pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Na camada de 0,10–0,20 m do solo, não houve diferença nos teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível entre as fontes aplicadas (Figura 33b), mas sim entre os tratamentos que receberam S e o controle a partir do quinto ano de estudo. No tratamento controle os teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível reduziram linearmente (valor 6 vezes inferior ao do início do estudo), apresentando no último ano um teor médio de $5,8 \text{ mg dm}^{-3}$, valor inferior ao nível crítico (Pauletti & Motta, 2017), o que pode comprometer o desenvolvimento das culturas. Em subsuperfície (Figura 33c e 33d) também não houve diferença dos teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível entre os tratamentos que receberam aplicação de S, porém ambos se diferenciaram do controle a partir do 4º e 5º ano de estudo para as camadas de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, respectivamente. No controle houve redução dos teores de $S-SO_4^{2-}$ em ambas as camadas do solo, sendo que nos dois últimos anos os teores já se encontravam abaixo dos ideais para o desenvolvimento das culturas ($< 9 \text{ mg dm}^{-3}$).

Nos três locais, observou-se que os solos apresentavam altos teores de $S-SO_4^{2-}$ no início dos experimentos. Contudo, com a ausência de reposição do S exportado pelas culturas via grãos e das perdas do mesmo para o ambiente, houve redução dos teores em todas as camadas ao longo do perfil do solo, chegando a valores inclusive abaixo dos ideais em um período de 6 anos em Goioxim. Esse tempo que demora para que o solo expresse deficiência de S pode ser bastante variável de acordo com as condições de cada local. No presente estudo, pode-se inferir que foi um tempo prolongado devido aos solos apresentarem altos teores de argila e de matéria orgânica, os quais aumentam a disponibilidade de $S-SO_4^{2-}$ para as plantas e apresentam boa capacidade de adsorção do nutriente (Rheinheimer et al., 2005). Dessa forma, o monitoramento dos teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível é imprescindível para evitar a ocorrência de deficiência de S para as culturas. Nas últimas duas décadas tem-se observado um aumento do rendimento de grãos das culturas, contudo, a aplicação de fertilizantes com S tem se mantido estável; assim espera-se que, para não ocorrer a redução dos teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível do

solo, as aplicações de S via fertilizantes seja aumentada significativamente, a fim de não comprometer o rendimento das culturas (Aula et al., 2019).

As aplicações anuais de S independente da fonte mostraram que o solo apresenta maior facilidade de acumular o nutriente em camadas subsuperficiais do que em superfície, o que se deve à maior capacidade de adsorção do nutriente em grupos funcionais oriundos principalmente dos minerais como óxidos de Fe e Al e caulinita (Rheinheimer et al., 2005) devido a um menor pH e menor concorrência com o fosfato por pontos de adsorção. Segundo Alvarez et al. (2007), além da formação de complexos de esfera interna, o $S-SO_4^{2-}$ pode ser retido eletrostaticamente nas cargas positivas do solo, as quais são mais presentes em subsuperfície, contudo, são ligações relativamente fracas. Na superfície do solo, os resultados mostraram que o S-elementar foi mais efetivo que o gesso para manter teores de $S-SO_4^{2-}$ mais elevados, o que se deve principalmente ao seu menor potencial de lixiviação (Ercoli et al., 2012). Em estudo conduzido por Aula et al. (2019) durante 10 anos determinou-se que a eficiência do uso de fertilizantes com S é baixa, sendo em média de apenas 18%, dessa forma, melhorias no manejo dos fertilizantes são necessárias para uma maior sustentabilidade do sistema. Essas melhorias no manejo passam necessariamente pela escolha da fonte de S correta, pela dose adequada e pela escolha do momento de maior necessidade das plantas, sempre buscando uma maior sincronia entre a disponibilidade de S do solo e a necessidade das plantas.

3.5 Produtividade de grãos em função da aplicação de S via gesso e S-Elementar

Não houve diferença na produtividade das culturas pelo uso das diferentes fontes de S (Tabela 9). Dos 27 cultivos avaliados nos três locais, em apenas quatro a aplicação do S aumentou a produtividade de grãos, sendo que todos os casos com efeito positivo ocorreram no experimento em Goioxim, com incremento médio de 9,9% no rendimento de grãos. Em uma recente revisão sistemática da resposta das culturas à adubação com S, Pias et al. (2019) observaram em média 19% de incremento nos cultivos em que houve resposta positiva, valor bem superior ao observado neste estudo.

Tabela 9. Produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) das culturas em função da aplicação de 75 kg ha^{-1} de enxofre a partir de gesso e S-Elementar em três locais em solos sob sistema plantio direto no Centro-Sul do PR.

Cultura	Ano	Tratamentos			Efeito
		Controle	Gesso	S-elementar	
-----Goioxim-----					
Milho	2012/2013	11,88 B	12,94 AB	13,70 A	*
Feijão	2013	0,78	0,80	0,80	ns
Trigo	2013	5,11	5,69	5,69	ns
Soja	2013/2014	3,88 B	4,24 A	4,15 AB	*
Cevada	2014	3,90 B	4,24 A	4,18 AB	*
Soja	2014/2015	4,03	4,19	4,12	ns
Milho	2015/2016	11,63	12,97	13,09	ns
Trigo	2016	7,09	6,92	6,79	ns
Soja	2016/2017	4,88	4,75	4,62	ns
Cevada	2017	3,27	3,36	3,29	ns
Soja	2017/2018	4,69	4,72	4,74	ns
Milho	2018/2019	13,55 B	14,39 A	14,25 A	*
Feijão	2019	1,95	2,34	2,30	ns
-----Reserva do Iguaçú-----					
Milho	2013/2014	13,37	13,73	13,15	ns
Cevada	2014	3,73	3,61	3,78	ns
Soja	2014/2015	3,67	3,49	3,64	ns
Trigo	2015	3,19	2,97	3,04	ns
Soja	2015/2016	5,39 A	5,41 A	5,09 B	*
Milho	2016/2017	15,12	15,63	15,27	ns
Soja	2017/2018	4,82	4,81	4,83	ns
-----Candói-----					
Cevada	2014	3,57	3,76	3,78	ns
Soja	2014/2015	4,82	4,91	4,97	ns
Soja	2015/2016	5,49	5,43	5,55	ns
Trigo	2016	5,63	5,68	5,70	ns
Soja	2016/2017	4,87	4,91	4,99	ns
Milho	2017/2018	13,36	13,44	13,38	ns
Soja	2018/2019	4,89	5,12	5,09	ns

* Significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ns = Não significativo.

A produtividade média das culturas nos três locais estudados foi alta principalmente para o milho ($13,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) e soja ($4,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) que superaram em 113 e 57% a produtividade média das respectivas culturas no Paraná (ano 2018/2019, CONAB, 2020). Dessa forma, a hipótese inicial de que mesmo que o solo apresentasse teores de S-SO_4^{2-} disponível acima do nível crítico, quando os cultivos apresentassem alta produtividade, haveria aumento da produtividade pela adubação sulfatada não se confirmou. Pias et al. (2019)

analisando a resposta de 57 cultivos à adubação com S não observaram resposta positiva em nenhum cultivo quando os teores de S estavam acima do nível crítico.

São escassos trabalhos no Brasil estudando fontes de S; entre os que estão disponíveis alguns demonstraram não haver diferença significativa entre as fontes (Fiorini et al., 2016), corroborando os resultados deste estudo. Enquanto outros estudos observaram maior eficiência para algumas fontes de fertilizantes, dependendo de características do ambiente de cultivo (Broch et al., 2011; Fano, 2015). Como o S-elementar não se diferenciou do gesso agrícola pode-se inferir que o seu uso, aliado a fertilizantes concentrados (NPK), pode ser uma estratégia eficiente para reduzir custos de transporte e aplicação (Horowitz & Meurer, 2007). Contudo, quaisquer inferências sobre as fontes de S deste estudo apresentam limitações, pois a maioria dos cultivos não respondeu positivamente à aplicação de S. No único cultivo com efeito significativo no experimento de Reserva do Iguaçu, observa-se que os tratamentos com S-elementar produziram 6% a menos que o tratamento com gesso agrícola e o controle, não havendo uma explicação plausível para tal resultado.

Segundo Rheinheimer et al. (2005) as culturas apresentam diferentes níveis de eficiência em absorver e translocar o S, o que resulta na recomendação de diferentes níveis críticos para diferentes grupos de culturas em alguns locais como no RS e SC (CQFS RS/SC, 2016). Contudo, neste estudo não foi observado tendência de haver maior resposta por culturas consideradas como mais exigente em S como a soja e o feijão em relação aos cereais. Avaliando a resposta das culturas de uma maneira conjunta por locais e o total de cultivos (Figura 34), observa-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos agrupados. A maior diferença ocorreu em Goioxim onde o controle produziu em média 6% a menos que os tratamentos que receberam adubação com S, porém, essa diferença não foi grande o suficiente para ser estatisticamente significativa. Järvan et al. (2008) citam que é mais comum a ocorrência de melhorias na qualidade dos grãos dos cereais do que respostas em produtividade pelo uso de adubação com S. O fornecimento de S aos cereais aumenta o teor de glúten dos grãos e a qualidade biológica das proteínas, devido ao incremento nas proporções de

cisteína e metionina, aminoácidos essenciais para a qualidade da farinha no processo de panificação (Järvan et al., 2008). Dessa forma, mesmo com ausência de incremento em produtividade na maioria dos cultivos avaliados neste estudo, pode ter ocorrido melhorias na qualidade dos grãos o que justifica futuras investigações nesta temática.

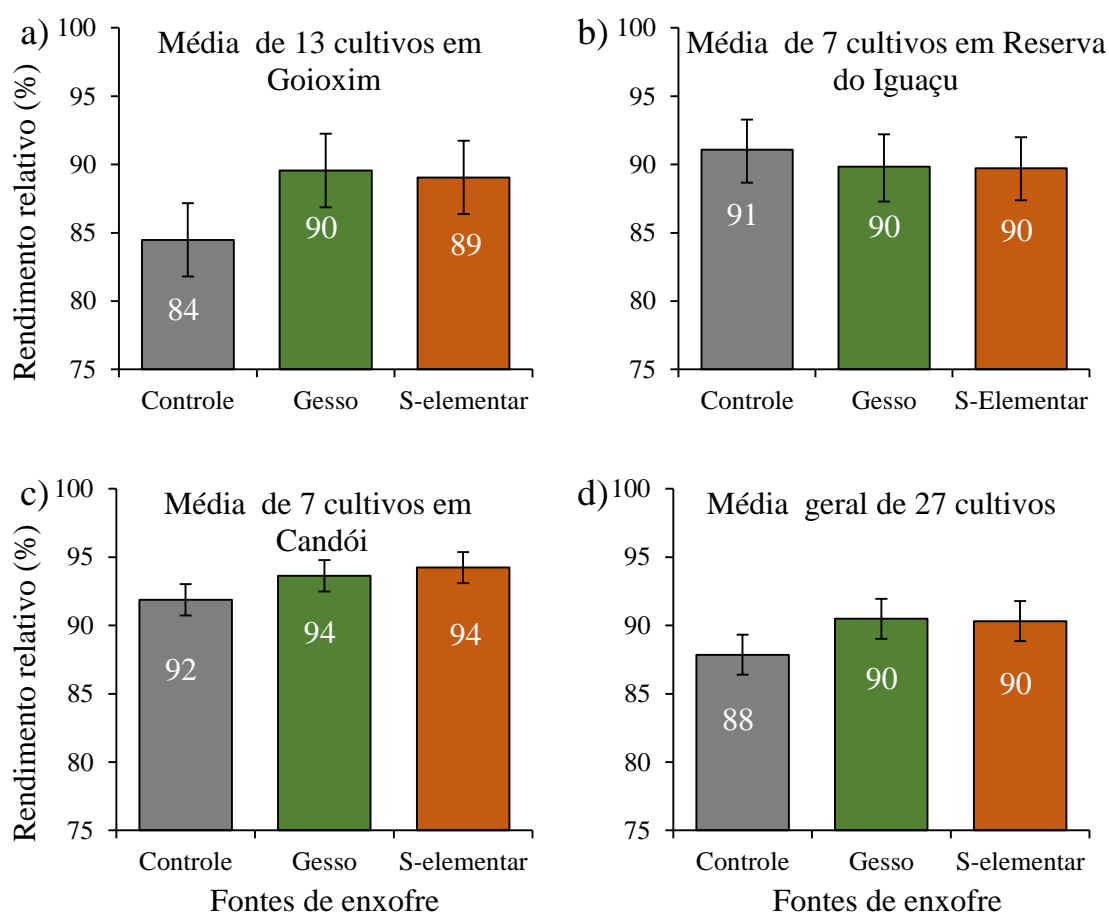


Figura 34. Média do rendimento relativo (%) das culturas nos diferentes cultivos em função da aplicação de 75 kg ha^{-1} de enxofre utilizando-se como fonte gesso e S-elementar em Goioxim (a), Reserva do Iguaçu (b), Candói (c) e todos os cultivos (d).

Na média dos 27 cultivos os tratamentos com S produziram apenas 2% a mais de grãos que o tratamento controle comprovando a ausência de viabilidade de aplicação (Figura 34d). A ausência de efeito da adubação com S está diretamente relacionada aos altos teores de MO, os quais foram superiores a 5,5% na camada superficial nos três locais. Em solos com alto teor de argila e de MO a probabilidade de haver resposta à adubação sulfatada é reduzida (Rheinheimer et al., 2005). Além da MO, que é a principal fonte de S no solo, a deposição atmosférica também auxiliou na reposição do S exportado

pelas culturas no tratamento controle. Ao longo dos anos de cultivo, observou-se que apenas a deposição atmosférica de S repôs em torno de 49%, 59% e 64% das exportações de S via grãos em Reserva do Iguaçu (73 kg de S ha⁻¹ exportado), Candói (78 kg de S ha⁻¹ exportado) e Goioxim (113 kg de S ha⁻¹ exportado), respectivamente.

3.6 Relação entre a produtividade das culturas e os teores de S-SO₄²⁻ disponível do solo

Confirmando os resultados anteriores em que não se observou efeito da aplicação de S na produtividade da maioria dos cultivos, na Figura 35, observa-se a ausência de relação entre os teores de S-SO₄²⁻ disponível do solo em diferentes camadas com o rendimento relativo das culturas. Esse resultado mostra que os fatores que limitaram a produtividade das culturas foram outros e não a disponibilidade de S-SO₄²⁻ no solo.

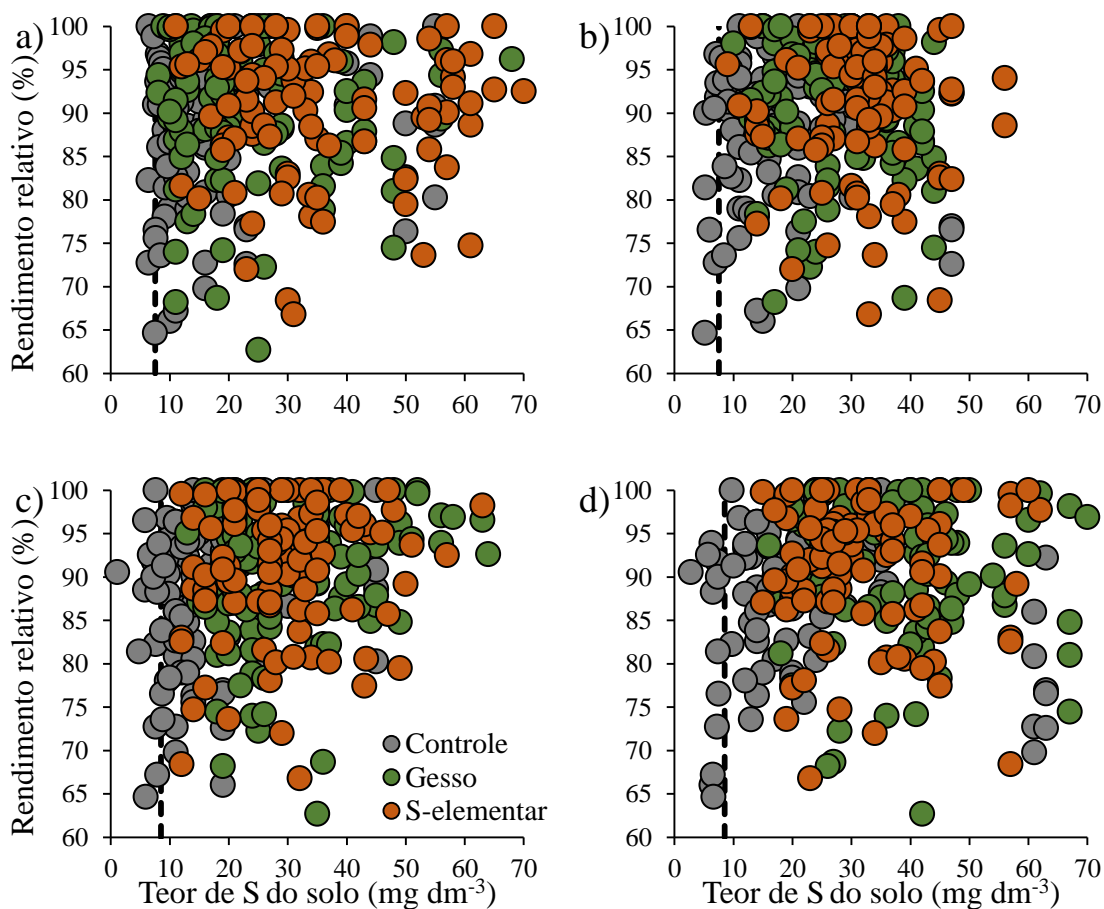


Figura 35. Rendimento relativo das culturas nos três locais de cultivo em função do teor de S-SO₄²⁻ (mg dm⁻³) disponível nas camadas de

0,00–0,10 (a), 0,10–0,20 (b), 0,20–0,40 (c) e 0,40–0,60 m (d) do solo. Linha tracejada representa os níveis críticos de S no solo determinados por Pias et al., (2019). n = 291 observações oriundas de 27 cultivos.

A ausência de resposta das culturas à aplicação de S tem sido recorrente no Brasil, inclusive em solos com teores abaixo do nível crítico (Rheinheimer et al., 2005; Fiorini et al., 2016; Pias et al., 2019) o que demonstra a necessidade de um refinamento das informações. Pias et al. (2019) observaram que mesmo em solos deficientes em S as culturas responderam à adubação em apenas 50% dos cultivos e principalmente em solos da região do Cerrado (clima tropical). Além disso, estudos como o de Aula et al. (2019) mostraram que a eficiência do uso de S pelas plantas é baixa (18%), dessa forma, a dose a ser aplicada em solos deficientes deve ser a recomendada pelos órgãos de pesquisa que é entre 20 e 30 kg ha⁻¹ (CQFS RS/SC 2016; Pauletti & Motta, 2017; Pias et al., 2019), afim de não reduzir ainda mais a eficiência de uso do fertilizante.

4 CONCLUSÕES

As aplicações anuais de fertilizante com S não aumentaram os teores de S-SO₄²⁻ disponível na camada superficial do solo ao longo do tempo, independente da fonte utilizada. Porém, o uso do S-elementar mantém mais alto os teores S-SO₄²⁻ na superfície do solo em relação ao uso do gesso, o que se deve à necessidade de prévia oxidação no solo para disponibilização do sulfato. O uso de aplicações anuais de S tanto de gesso quanto S-elementar aumentou a disponibilidade do S-SO₄²⁻ disponível em camadas subsuperficiais (> 0,20 m). Mesmo em solos com altos teores de argila e matéria orgânica a não aplicação de S por vários cultivos (7 anos) reduziu os teores de S-SO₄²⁻ em todas as camadas do solo, tornando o solo deficiente em S.

Em apenas 4 de 27 (14,8%) cultivos avaliados houve aumentos na produtividade de grãos pela adubação com S, sendo os incrementos médios nesses cultivos de 9,9%. Os efeitos positivos da adubação com S ocorreram apenas no experimento em Goioxim, sendo que a partir das informações disponíveis (atributos de solo e deposição atmosférica de S) não foi possível detectar o motivo da diferença de resposta entre os ambientes. As fontes de S,

gesso e S-elementar não diferiram em relação ao rendimento de grãos das culturas. O efeito médio das aplicações anuais de S em cada localidade variou de -1 a +6% na produtividade acumulada das culturas. Portanto, em solos com teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível acima do nível crítico não é viável a recomendação de adubação com S mesmo em ambientes de alta produtividade, onde parte da demanda de S ($\approx 60\%$) é suprida pela deposição atmosférica de S. O manejo da adubação com S deve preconizar a reposição do S exportado pelos grãos na colheita e o contínuo monitoramento dos teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível no solo visando garantir a manutenção da capacidade de suprimento de S pelo solo às culturas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese buscou avaliar por meio de revisões da literatura, os resultados disponíveis de resposta das culturas à adubação sulfatada e ao uso do gesso agrícola, buscando indicar recomendações técnicas para o manejo das culturas de grãos em solos sob SPD no Brasil. Na sequência, foram apresentados resultados inéditos de estudos de campo com as temáticas conduzidos no Centro-Sul do Paraná, aonde se buscou testar e discutir a eficácia das inferências realizadas a partir das revisões da literatura.

No capítulo I realizou-se uma meta-análise da resposta das culturas de grãos ao uso do gesso agrícola. O gesso agrícola é um condicionador de solos ácidos, que tem sido amplamente utilizado no Brasil, mesmo sem haver recomendação técnica para alguns estados do Brasil, como Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS RS/SC 2016). Além disso, as recomendações vigentes são baseadas em estudos conduzidos em sistema de preparo convencional. Este estudo mostrou que em SPD os níveis críticos para a recomendação do gesso são diferentes dos determinados em sistema de preparo convencional, sendo que as culturas respondem positivamente ao gesso em solos com níveis de acidez inferior aos recomendados atualmente. Além disso, detectou-se a necessidade de se utilizar níveis críticos distintos para a soja e cereais, sendo que a soja só responde positivamente ao gesso quando há a ocorrência de déficit hídrico. De maneira geral, constatou-se que o gesso agrícola quando bem posicionado pode mitigar os efeitos adversos da acidez em subsuperfície e favorecer o desenvolvimento das culturas incrementando em média 7 e 14% o rendimento de grãos para anos sem e com déficit hídrico, respectivamente. Portanto, o uso do gesso pode evitar a necessidade de reinicialização do SPD para correção da acidez em profundidade com incorporação do calcário.

Os resultados de campo (capítulo II) comprovaram a efetividade do que se determinou na meta-análise em relação aos níveis críticos de saturação por Al para a recomendação do gesso, que foram de 5 e 10 % para os cereais e a soja, respectivamente. No solo avaliado a saturação por Al estava abaixo dos níveis críticos, e por consequência, não houve resposta positiva pela aplicação do gesso na ampla maioria dos cultivos. Nesse estudo, foi avaliado também o uso de calcário com diferentes reatividades em combinação com o gesso. Os resultados mostraram que diferente do esperado, em um solo com boa estrutura física e qualidade biológica o calcário é capaz de reduzir a acidez do solo em profundidade em um curto prazo (< 1 ano), fato ainda pouco aceito no meio científico para solos sob SPD. Esse mesmo capítulo também mostrou que os efeitos do calcário de alto e baixo PRNT são similares, mas o de baixo PRNT apresenta maior efeito residual, mantendo adequado os parâmetros de acidez do solo para o desenvolvimento das culturas mesmo após 12 anos de sua aplicação. O uso da calagem influenciou positivamente a produtividade da cultura da soja, que se mostrou mais sensível à acidez superficial do solo em relação aos cereais, o que supostamente está relacionado com a eficiência da fixação biológica de nitrogênio que decresce em solos ácidos.

A avaliação da resposta das culturas à adubação com S em solos sob SPD (capítulo III) mostrou que as recomendações utilizadas atualmente, as quais foram desenvolvidas em sistema de preparo convencional continuam sendo bons parâmetros para o SPD, contudo, podem ser refinadas. De maneira geral, pode-se observar que mesmo em solos deficientes em S a probabilidade de resposta positiva das culturas é baixa na região subtropical (22%), porém alta em clima tropical (92%). Em solos com teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível acima do nível crítico não se observou resposta positiva das culturas independente das demais condições de cultivo. Em solos deficientes em S, nos cultivos em que houve resposta positiva, à aplicação de S incrementou em média o rendimento de grãos em 16%.

Os níveis críticos de $S-SO_4^{2-}$ disponível nas camadas superficial (0,00–0,20) e subsuperficial (0,20–0,40) do solo, determinadas na revisão sistemática, foram de 7,5 e 8,5 $mg\ dm^{-3}$, respectivamente. Nos experimentos de campo (capítulo IV), realizados em três locais todos apresentavam altos teores iniciais de $S-SO_4^{2-}$ disponível (acima dos níveis críticos) e, portanto com

baixa probabilidade das culturas apresentarem resposta positiva à adubação com S. O tempo de condução dos estudos variaram de 4 a 7 anos, e apenas no estudo conduzido durante 7 anos os teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível reduziram a valores abaixo do nível crítico, aumentando a probabilidade de resposta positiva. Esse longo período para tornar o solo dos tratamentos controle deficiente em S demonstra a alta resiliência dos solos da região, o que é justificada pelos altos teores de matéria orgânica e de argila. Dos 27 cultivos avaliados, apenas quatro responderam positivamente ao S, sendo todos eles no experimento em Goioxim, fato em que não foi possível esclarecer os motivos de diferença nas respostas das culturas entre os locais, e novas investigações estão sendo conduzidas nesse local. Dessa forma, pode-se inferir que os níveis críticos determinados anteriormente apresentaram uma boa assertividade, mesmo em uma região com alta produtividade e, por consequência com alta demanda por S. As fontes de S avaliadas gesso e S-elementar não diferiram entre si em relação à produtividade das culturas, porém o S-elementar manteve os teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível da camada superficial do solo mais elevados.

Esta tese destaca a importância de se iniciar o SPD de uma maneira adequada para evitar a presença de alta acidez na subsuperfície do solo. Em áreas em que a acidez está presente o gesso pode ser uma alternativa como medida paliativa para reduzir as perdas de rendimento, principalmente em anos com ocorrência de déficit hídrico. O uso do gesso deve estar sempre atrelado ao uso do calcário dolomítico a fim de evitar deficiência induzida de Mg^{2+} nas plantas, e para que a médio/longo prazo ocorra a efetiva correção da acidez ao longo do perfil do solo. Em relação ao S foi estabelecido níveis críticos para a camada superficial e subsuperficial, devendo-se realizar o monitoramento periódico dos teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível do solo, para que estes permaneçam acima dos valores críticos e assim não comprometam o desenvolvimento das culturas. A reposição dos teores de S pode ser feita com ambas as fontes estudadas (gesso e S-elementar) devendo a escolha entre elas ser baseada no custo de aquisição do fertilizante e da aplicação. Em resumo, a partir de revisões da literatura e de experimentos de campo esta tese estabeleceu níveis críticos de acidez para a recomendação de gesso como condicionador de solos ácidos e de manejo da adubação sulfatada para

culturas de grãos conduzidas em solos sob SPD no Brasil. Espera-se que as informações trazidas nesta tese possam auxiliar a comunidade científica no entendimento de aspectos relacionados ao manejo do gesso e de fertilizantes com S para culturas de grãos em SPD, assim como sejam útil aos produtores brasileiros no manejo de seus solos, favorecendo o aumento da produtividade, aliada à sustentabilidade social, econômica e ambiental.

REFERÊNCIAS

ADAMS, D. C.; GUREVITCH, J.; ROSENBERG, M. S. Resampling tests for meta-analysis of ecological data. **Ecology**, Washington, v. 78, n. 4, p. 1277–1283, 1997.

ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and Aluminum Speciation as Affected by Surface Liming in Tropical No-Till Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, n. 3, p. 1010–1017, 2010.

ALVAREZ, V. H. et al. Enxofre. *In*: NOVAIS, R. F. et al. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. cap. 10, p. 596–635.

ARF, O. et al. Gesso aplicado na superfície do solo no desenvolvimento do arroz de terras altas sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1136–1141, 2014.

AULA, L. et al. World Sulfur Use Efficiency for Cereal Crops. **Agronomy Journal**, Madison, v. 111, n. 5, p. 2485–2492, 2019.

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Fontes, doses e parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura para feijoeiro comum irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 1, p. 69–76, 2005.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, n. 4, p. 1612–1622, 2017.

BENNETT, J. Mc. L. et al. Influence of lime and gypsum on long-term rehabilitation of a Red Sodosol, in a semi-arid environment of New South Wales. **Soil Research**, Clayton South, v. 52, n. 2, p. 120–128, 2014.

BISSANI, C. A. et al. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2008. 344p.

BLUM, S. C. et al. Assessing available soil sulphur from phosphogypsum applications in a no-till cropping system. **Experimental Agriculture**, New York, v. 50, n. 4, p. 516–532, 2014.

BLUM, S. C. et al. Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization

in soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 200-1, n. 1, p. 156–164, 2013.

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, v. 38, n. 1, p. 262–271, 2014.

BROCH, D. L. et al. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 3, p. 791–796, 2011.

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, v. 22, n. 2, 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, 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, v. 28, n. 1, p. 125–136, 2004.

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. et al. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 357–364, 2002.

CAIRES, E. F. et al. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO₃-N in subsoil. **Pedosphere**, Nanjing, v. 26, n. 4, p. 474–485, 2016.

CAIRES, E. F. et al. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 315–327, 1999.

CAIRES, E. F. et al. Soybean yield and quality a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 370–379, 2006.

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, 2011b.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, Cranfield, v. 27, n. 1, p. 45–53, 2011a.

CALEGARI A. et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, n. 1, p. 32–39, 2013.

CARMONA, F. C. et al. Disponibilidade no solo, estado nutricional e recomendação de enxofre para o arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 345–355, 2009.

CASTAÑON, T. H. F. M. et al. Uso do gesso agrícola na cultura da soja, na região sul do estado de mato grosso. **Ciência Tecnológica**, Jaboticabal, v. 3, n. 1, p.1–4, 2011.

CHERUBIN, M. R. et al. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 75, n. 3, p. 255–72, 2018.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Preço dos insumos Agropecuários 2017** [internet]. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; 2018. Disponível em: <http://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultainsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>. Acesso em: 05 fev. 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica de safras agrícolas** [internet]. 2017. Disponível em: <http://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultainsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>. Acesso em: 15 Fev. 2017.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica de safras agrícolas** [internet]. 2020. Disponível em: <http://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultainsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>. Acesso em: 16 Mar. 2020.

COTRUFO, M. F. et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, Champaign, v. 19, n. 1, p. 988–995, 2013.

COSTA, C. H. M. **Calagem superficial e aplicação de gesso em sistema plantio direto de longa duração: efeitos no solo e na sucessão milho/crambe/feijão-caupi**. 2015. 97 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”; Botucatu, 2015.

COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 74, n. 1, p.119–132, 2016.

CQFS, RS/SC - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e**

Santa Catarina. 11. ed. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

CRUSCIOL, C. A.C. et al. Aplicação de enxofre em cobertura no feijoeiro em sistema de plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 3, p. 459–465, 2006.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, Cremlingen, v. 137, n. 1, p. 87–99, 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.

DALLA NORA, D. et al. Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, n. 1, p. 1–22, 2017b.

DALLA NORA, D. et al. Modern High-Yielding Maize, Wheat and Soybean Cultivars in Response to Gypsum and Lime Application on No-Till Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, n. 1, p. 1–21, 2017a.

DEGRYSE, F. et al. Uptake of elemental or sulfate-S from fall- or spring-applied co-granulated fertilizer by corn. A stable isotope and modeling study. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 221, n. 1, p. 322–332, 2018.

DIVITO, G. A. et al. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: Performance of S and N:S determinations in leaf, shoot and seed. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 180, n. 1, p. 167–175, 2015.

DUARTE, A. P. et al. Reference Values of Grain Nutrient Content and Removal for Corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, n. 1, p. 1–12, 2019.

ERCOLI L. et al. Durum wheat grain yield and quality as affected by S rate under Mediterranean Conditions. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 35, n. 2, p. 63–70, 2011.

ERCOLI, L. et al. Management of sulphur fertiliser to improve durum wheat production and minimise S leaching. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 38, n. 1, p. 74–82, 2012.

ERIKSEN, J. et al. Sulphur mineralization in five Danish soils as measured by plant uptake in a pot experiment. **Agriculture, Ecosystems and Environmental**, Amsterdam, v. 56, n. 1, p. 43–51, 1995.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 128, n. 1, p. 221–266, 2014.

FANO, A. **Fontes de enxofre e manejo de nitrogênio na produtividade e qualidade industrial de trigo**. 2015. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

FEBRAPDP - FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Área de sistema plantio direto** [internet]. Fóz do Iguaçu, PR: Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, 2018. Disponível em: <https://febrapdp.org.br/download/34024evolucao-do-sistema-plantio-dibeto-1972a2018-jpg.jpg>. Acesso em: 12 Mai. 2020.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FIORINI, I. V. A. et al. Avaliação de fontes de enxofre e das formas de micronutrientes revestindo o NPK na cultura do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 15, n. 1, p. 20–29, 2016.

FOIS, D. A. F. et al. Efeito do gesso agrícola na disponibilidade de enxofre e no rendimento da soja e milho Safrinha. **Cultivando o saber**, Cascavel, v. 10, n. 3, p. 314–326, 2017.

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, n. 1, p. 27–41, 2019.

FRANDOLOSO, J. F. et al. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 5, p. 686–694, 2010.

FREITAS, L. A. et al. Desempenho agrônômico da cultura do milho submetido a sistemas de manejos e residual de gesso. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 6, n. 1, p. 123–133, 2017.

FREITAS, L. A. et al. Efeito dos sistemas conservacionistas do solo e residual do gesso sobre a cultura da soja. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 1, p. 375–379, 2016.

GALETTO, S. L. **Eficiência da adubação fosfatada influenciada pela aplicação de gesso agrícola em sistema plantio direto**. 2016. 203 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Pato Branco, 2016.

GELAIN, E. et al. Fixação biológica de nitrogênio e teores foliares de nutrientes na soja em função de doses de molibdênio e gesso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 259–269, 2011.

GONÇALVES, J. R. P. et al. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 369–375, 2011.

HOLLAND, J. E. et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. **Science Total Environment**, Iowa, v. 610–11, n. 1, p. 316–332, 2018.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 822–828, 2006.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Relação entre atributos de solos e oxidação de enxofre elementar em quarenta e duas amostras de solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 455–463, 2007.

JÄRVAN, M. et al. The effect of sulphur fertilization on yield, quality of protein and baking properties of winter wheat. **Agronomy Research**, Tartu, v. 6, n. 2, p. 459–469, 2008.

JORIS, H. A. W. et al. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 162, n. 1, p. 68–77, 2016.

KAEFER, J. E. et al. Produtividade de grãos e componentes de produção da canola de acordo com fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 273–280, 2014.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality response to long-term tillage and crop rotation practices. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, n. 1, p. 54–64, 2013.

KIHARA J. et al. Application of secondary nutrients and micronutrients increases crop yields in sub-Saharan Africa. **Agronomy Sustainable and Development**, Paris, v. 37, n. 25, p. 1–14, 2017.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.; BARTZ, H. **Proposta de nova equação para determinação do valor de H +Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e SC**. In: REUNIÃO ANUAL DA ROLAS, 2001, Frederico Westphalen. **Anais**. Frederico Westphalen: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001. p. 1-8.

LANGE, A, et al. Produtividade de milho safrinha em consórcio com capim-marandu em função de fontes e doses de nitrogênio em cobertura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 1, p. 35–47, 2014.

LEGUIZAMÓN, M. B. G. **Residualidad del yeso agrícola en el cultivo de soja (*Glycine max* L.) en un suelo arenoso**. 2017. 37 f. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, 2017.

LOCK, R. H. et al. **Statistics: Unlocking the power of data**. 2. ed. Nova Jersey: Wiley, 2017. 786 p.

LOPES, L. O. et al. Effect of sources and doses of sulfate on soybean crop. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 47, n. 3, p. 296–302, 2017.

- LOPES A. S, et al. **Sistema plantio direto**: Bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), 2004. 110p.
- LOURENTE, E. R. P. et al. Culturas antecessoras, doses e fontes de nitrogênio nos componentes de produção do milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 55–61, 2007.
- LUCAS, F. L. et al. Produtividade e qualidade de grãos de canola em função da adubação nitrogenada e sulfatada. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 3205–3218, 2013.
- MALAVOLTA, E. et al. **Avaliação do estado nutricional de plantas**: Princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos, 1997. 308 p.
- MARTINS, A. P. et al. Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 144, n. 1, p. 141–149, 2014.
- MARCHESAN, E. et al. Soil management and application of agricultural gypsum in a Planosol for soybean cultivation. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 11, p. 1-7, 2017.
- MARQUES, R. R. **Aplicação superficial de calcário e gesso em manejo conservacionista de solo para cultivo de amendoim e aveia branca**. 2008. 158 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.
- MEERT, L. **Propriedades químicas do solo e resposta da sucessão trigo-milho-trigo à calagem e à aplicação de doses de gesso em sistema plantio direto**. 2013. 41 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2013.
- MEGDA, M. M. et al. Resposta de cultivares de trigo ao nitrogênio em relação às fontes e épocas de aplicação sob plantio direto e irrigação por aspersão. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1055–1060, 2009.
- MENDES, I. C. et al. Soil health assessment and maintenance in Central and South-Central Brazil. In: DON R (ed.). **Managing soil health for sustainable agriculture**. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 2. ed. 2018. cap. 18, p. 360–375.
- MENDES, M. C. et al. Dose de nitrogênio associado a enxofre elementar em cobertura na cultura do milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 1, p. 96–106, 2014.
- MICHALOVICZ L. et al. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 38, n. 5, p. 1496–1505, 2014.

MINATO, E. A. et al. Teores foliares de macronutrientes e produção de milho (*Zea mays* L.) após gessagem em um Latossolo Vermelho distrófico típico. **Scientia Agrária Paranaensi**, Marechal Cândido Rondon, v. 16, n. 1, p. 219–224, 2017.

MOURTZINIS, S. et al. Soybean response to nitrogen application across the United States: A synthesis-analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 215, n. 1, p. 74–82, 2018.

MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C. **Adubação de enxofre para a cultura do milho sob plantio convencional e direto em solo de cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrado, 2008. 4p.

MIRANSARI, M. Soybean and Acidity Stress. *In*: MIRANSARI, M. (ed.). **Environmental Stresses in Soybean Production: Soybean Production**. 2. ed. Cambridge: Academic Press, 2016. cap. 10, p. 229–250.

MODA, L. R. et al. Gessagem na cultura da soja no sistema de plantio direto com e sem adubação potássica. **Revista Agro@mbiental**, Boa Vista, v. 7, n. 2, p. 129–135, 2013.

NASCENTE, A. S. et al. Common bean grain yield as affected by sulfur fertilization and cultivars. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64, n. 5, p. 548–552, 2017.

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 409–416, 2010.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, n. 1, p. 47–57, 1996.

OSÓRIO FILHO, B. et al. Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviais e respostas de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 712–719, 2007.

PAULETTI, V. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 495–505, 2014.

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. 289 p.

PEREIRA, C. S. et al. Doses de potássio com a presença de enxofre na cultura da soja. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 9, n. 1, p. 22–32, 2016.

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

PITTELKOW, C. M. et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. **Nature**, London, v. 517, n. 1, p. 365–340, 2015.

PRANDO, A. M. Características produtivas do trigo em função de fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 34–41, 2013.

PRIMO, J. P. et al. Efeito da adubação com enxofre na cultura da soja. **Cultivando o saber**, Cascavel, v. 5, n. 3, p. 74–80, 2012.

RAIJ, B. V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p.

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, v. 35, n. 5, p. 1687–1698, 2011.

RAMPIM, L. et al. Foliar tissue, grain yield and economic return by surface application of gypsum and different number of soybean plants in precision seed drill. **African Journal of Agronomy**, Ago-Iwoye, v. 10, n. 3, p. 1636–1646, 2015.

REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. Adubação com Enxofre. *In*: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. cap. 9, p. 227–242.

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

RHEINHEIMER, D. S. 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, n. 1, 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, n. 1, p. 7–16, 2018b.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 562–569, 2005.

RITCHEY, K. D. et al. Calcium Leaching to Increase Rooting Depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, n. 1, 40–44, 1980.

RODRIGHERO, M. B. et al. et al. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 1723–1736, 2015.

ROSOLEM, C. A.; MARCELLO, C. S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 448–455, 1998.

SALVAGIOTTI F. et al. N:P:S stoichiometry in grains and physiological attributes associated with grain yield in maize as affected by phosphorus and sulfur nutrition. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 203, n. 1, p. 128–138.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 356p.

SÁVIO, F. L. et al. Calagem e gessagem na nutrição e produção de soja em solo com pastagem degradada. **Revista Agrotecnológica**, Ipameri, v. 2, n. 1, p. 19–31, 2011.

SCHERER, H. W. Sulphur in crop production — invited paper. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 14, n. 2, p. 81–111, 2001.

SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 2015.

SFREDO, G. J. et al. Enxofre: Níveis críticos para a soja, nos solos do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003, Ribeirão Preto. **Anais**. Ribeirão Preto: Universidade Estadual de São Paulo, 2003. p. 1-9.

SOARES, G. F. **Gesso e fósforo na sucessão soja/milho safrinha**. 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agronomia - Produção Vegetal, Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2016.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 353 p.

SOMAVILLA, L. et al. Response of soybean and corn to soil mechanical intervention and agricultural gypsum application to the soil surface. **Sêmima: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37, n. 1, p. 95–102, 2016.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Dolomite and phosphogypsum surface application effects on annual crops nutrition and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, n. 1, p. 261–270, 2008a.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Nutrição e produtividade de grãos da

aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 715–725, 2008b.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA, E. D. et al. Soil quality indicators in a Rhodic Paleudult under long term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 139, n. 1, p. 28–36, 2014.

SOUZA F. R. et al. Atributos físicos e desempenho agronômico da cultura da soja em um Latossolo Vermelho distroférico submetido a dois sistemas de manejo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 6, p. 1357–1364, 2010.

SOUZA, L. C. F. et al. Teor de proteína e de óleo nos grãos de soja em função do tratamento de sementes e aplicação de micronutrientes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 6, p. 1586–1593, 2009.

SUTAR, R. K. et al. Sulphur Nutrition in Maize – A Critical Review. **International Journal of Pure and Applied Bioscience**, Kota, v. 5, n. 6, p. 1582–1596, 2017.

TANAKA, S. Y. W. **Aplicación de yeso y cal agrícola en la sucesión soja – trigo en siembra directa en un ultisol**. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Posgrado en Ciencia del Suelo y Ordenamiento Territorial Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, 2013.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

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, v. 42, n. 1, 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**, Germantown, v. 65, n. 14, p. 1998–2012, 2019.

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

TITTONEL, P. et al. Unraveling the effects of soil and crop management on maize productivity in small holder agricultural systems of western Kenya - An application of classification and regression tree analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 123, n. 1-3, p. 137–150, 2008.

TIRITAN, C. S. et al. Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 437–447, 2016.

TRINDADE, B. S. **Atributos químicos do solo e a produtividade de grãos afetados pelo gesso agrícola com e sem irrigação**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

VIEIRA-FILHO, M. S. et al. Influence of local sources and topography on air quality and rainwater composition in Cubatão and São Paulo, Brazil. **Atmospheric Environment**, Madison, v. 101, n. 1, p. 200–208, 2015.

VIEIRA, R. C. B. et al. Potassium fertilization for long term no-till crop rotation in the central-southern region of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, n. 1, p. 1–16, 2016.

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, v. 40, n. 1, p. 1–17, 2016.

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

WERNER, O. V. et al. Nitrogen and sulfur applied to the coverage of a canola crop in no-tillage system. **African Journal of Agriculture Research**, Ago-Iwoye, v. 8, n. 17, p.1799–1803, 2013.

YANO, G. T. et al. Avaliação de fontes de nitrogênio e épocas de aplicação em cobertura para o cultivo do trigo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 2, p. 141–148, 2005.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Gypsum application and ionic speciation of the solution from an Oxisol under no-till system. **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, v. 128–137, 2015.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: A review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 144, n. 1, p. 1–44, 2017.

APÊNDICE

1. Parâmetros químicos e físicos do calcário com alto e baixo poder relativo de neutralização total (PRNT) e do gesso agrícola utilizado no experimento em Guarapuava, PR.

Parâmetros	Baixo PRNT	Alto PRNT	Gesso agrícola
CaO (%)	29,0	28,0	-
MgO (%)	19,0	21,5	-
Poder de neutralização (%)	99,0	103,4	-
Peneira malha de 2,00 mm (%)	100,0	100,0	-
Peneira malha 0,84 mm (%)	84,0	98,0	-
Peneira malha 0,30 mm (%)	57,0	95,0	-
Reatividade (%)	76,4	97,0	-
PRNT (%)	75,7	100,5	-
Ca (%)	-	-	18,0
S (%)	-	-	14,0

2. Análise de variância do efeito de diferentes estratégias de calagem superficial e de doses de gesso agrícola a curto (1 anos) e longo prazo (11 anos) nas propriedades químicas de um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

Tratamentos	Anos após aplicação	Propriedades químicas do solo				
		pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V
Estratégias de calagem (C)	1	*	ns	ns	*	*
	11	**	**	ns	**	ns
Doses de gesso (G)	1	**	ns	**	**	ns
	11	ns	ns	**	**	ns
Camada do solo (S)	1	**	**	**	**	**
	11	**	**	**	**	**
C x G	1	ns	ns	ns	ns	ns
	11	ns	ns	ns	ns	ns
C x S	1	ns	**	*	**	ns
	11	**	**	**	ns	**
G x S	1	ns	ns	**	**	ns
	11	ns	ns	ns	ns	ns
C x G x S	1	ns	ns	ns	ns	ns
	11	ns	ns	ns	ns	ns

ns = não significativo. * p < 0,05 e ** p < 0,01.

3. Análise de variância do efeito de diferentes estratégias de calagem superficial e de doses de gesso agrícola na produtividade de grãos de diferentes culturas conduzidas em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

Cultura/ano	Calagem	Gesso	Calagem x Gesso
Aveia branca (2004)	ns	*	ns
Soja (2004/2005)	ns	ns	ns
Milho (2005/2006)	ns	ns	ns
Trigo (2006)	ns	ns	ns
Soja (2006/2007)	**	ns	ns
Soja (2007/2008)	*	ns	ns
Aveia branca (2008)	ns	ns	ns
Soja (2008/2009)	**	ns	ns
Milho (2009/2010)	*	ns	ns
Trigo (2010)	ns	ns	ns
Soja (2010/2011)	ns	ns	ns
Cevada (2011)	*	*	ns
Soja (2011/2012)	ns	ns	ns
Aveia branca (2012)	*	*	ns
Soja (2012/2013)	*	ns	ns
Milho (2013/2014)	ns	ns	ns
Trigo (2014)	ns	ns	ns
Soja (2014/2015)	ns	ns	ns
Cevada (2015)	ns	ns	ns
Soja (2015/2016)	ns	ns	ns
Aveia branca (2016)	ns	ns	ns
Soja (2016/2017)	ns	ns	ns
Acumulado cereais (12 cultivos)	ns	ns	ns
Acumulado soja (10 cultivos)	**	ns	ns
Total (22 cultivos)	ns	ns	ns

ns = não significativo. * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$.

4. Análise de variância do efeito de diferentes estratégias de calagem superficial e de doses de gesso agrícola na concentração de nutrientes foliares de diferentes culturas conduzidas em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
-----Aveia branca (2004)-----						
Calagem (C)	ns	ns	ns	ns	*	ns
Gesso (G)	ns	*	ns	*	ns	*
C x G	ns	ns	ns	ns	*	ns
-----Soja (2004/2005)-----						
Calagem (C)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	*	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	*	ns
-----Milho (2005/2006)-----						
Calagem (C)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Gesso (G)	ns	ns	ns	*	ns	*
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns
-----Trigo (2006)-----						
Calagem (C)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Gesso (G)	ns	ns	ns	*	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	*	ns
-----Soja (2006/2007)-----						
Calagem (C)	*	ns	ns	*	ns	ns
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns
-----Soja (2007/2008)-----						
Calagem (C)	*	ns	ns	ns	*	ns
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	*	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns
-----Aveia branca (2008)-----						
Calagem (C)	ns	*	ns	ns	*	ns
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	*	ns
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns
-----Soja (2008/2009)-----						
Calagem (C)	*	*	*	ns	ns	ns
Gesso (G)	ns	*	ns	ns	*	*
C x G	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns = não significativo. * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$.

5. Teor de nutriente (g kg^{-1}) no tecido foliar das culturas (média \pm desvio padrão) em função da aplicação superficial de calcário com baixa e alto poder relativo de neutralização total (PRNT) em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

Tratamento	N		P		K		Ca		Mg		S	
-----Soja (2004/2005)-----												
Controle	34,70 \pm 2,80	ns	3,82 \pm 0,25	ns	25,28 \pm 3,49	ns	10,67 \pm 1,32	ns	3,33 \pm 0,29	ns	1,68 \pm 0,42	ns
Baixo PRNT	36,52 \pm 2,44		4,00 \pm 0,32		26,75 \pm 2,15		10,50 \pm 1,26		3,71 \pm 0,36		1,83 \pm 0,21	
Alto PRNT	38,76 \pm 2,52		4,16 \pm 0,37		23,79 \pm 2,41		11,19 \pm 1,62		3,98 \pm 0,75		2,05 \pm 0,19	
Alto PRNT parc ⁽¹⁾	36,38 \pm 3,49		4,13 \pm 0,38		26,71 \pm 2,67		9,83 \pm 1,66		3,50 \pm 0,46		1,99 \pm 0,19	
-----Milho (2005/2006)-----												
Controle	25,80 \pm 1,79	ns	2,97 \pm 0,27	ns	21,78 \pm 2,36	ns	5,39 \pm 0,92	ns	3,55 \pm 0,63	ns	1,50 \pm 0,47	ns
Baixo PRNT	27,16 \pm 1,54		3,22 \pm 0,67		19,08 \pm 2,01		6,15 \pm 1,17		3,94 \pm 0,88		1,69 \pm 0,77	
Alto PRNT	25,71 \pm 1,73		3,15 \pm 0,25		18,16 \pm 2,45		6,82 \pm 1,20		4,61 \pm 0,83		1,63 \pm 0,21	
Alto PRNT parc ⁽¹⁾	26,58 \pm 0,96		3,29 \pm 0,83		20,77 \pm 2,97		5,83 \pm 0,63		3,73 \pm 0,83		1,59 \pm 0,42	
-----Trigo (2006)-----												
Controle	13,00 \pm 1,01	ns	2,11 \pm 0,22	ns	16,27 \pm 2,74	ns	1,63 \pm 0,17	ns	0,79 \pm 0,18	ns	1,00 \pm 0,10	ns
Baixo PRNT	11,73 \pm 0,83		2,03 \pm 0,21		15,75 \pm 2,46		1,64 \pm 0,23		0,85 \pm 0,17		0,86 \pm 0,12	
Alto PRNT	12,34 \pm 1,37		2,32 \pm 0,26		15,31 \pm 2,94		1,78 \pm 0,26		0,96 \pm 0,17		0,90 \pm 0,09	
Alto PRNT parc ⁽¹⁾	12,21 \pm 1,09		2,27 \pm 0,25		15,33 \pm 3,52		1,77 \pm 0,25		0,91 \pm 0,19		0,94 \pm 0,11	

⁽¹⁾ A dose foi dividida em três aplicações anuais. ns = não significativo pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

6. Teor de nutrientes (g kg^{-1}) no tecido foliar das culturas (média \pm desvio padrão) em função da aplicação de diferentes doses de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

Dose gesso	N	P	K	Ca	Mg	S
-----Aveia branca (2004)-----						
0	10,84 \pm 1,03	2,26 \pm 0,19	19,52 \pm 2,61	2,43 \pm 0,31	1,22 \pm 0,15	0,78 \pm 0,11
3	10,80 \pm 1,14	2,37 \pm 0,14	18,63 \pm 1,13	2,69 \pm 0,31	1,23 \pm 0,18	1,33 \pm 0,32
6	10,50 \pm 0,93	2,51 \pm 0,18	18,54 \pm 2,75	2,83 \pm 0,34	1,22 \pm 0,17	1,48 \pm 0,22
9	10,78 \pm 1,04	2,54 \pm 0,22	19,74 \pm 1,27	3,04 \pm 0,32	1,18 \pm 0,13	1,69 \pm 0,23
Efeito	ns	*L	ns	*L	ns	*Q
-----Soja (2004/05)-----						
0	37,15 \pm 3,53	4,00 \pm 0,36	25,13 \pm 3,92	10,35 \pm 1,78	3,88 \pm 0,63	1,77 \pm 0,24
3	36,70 \pm 3,04	4,04 \pm 0,28	26,37 \pm 2,54	10,38 \pm 1,14	3,67 \pm 0,49	1,93 \pm 0,26
6	35,48 \pm 3,32	3,98 \pm 0,42	25,23 \pm 2,53	10,91 \pm 1,74	3,68 \pm 0,56	1,85 \pm 0,44
9	37,03 \pm 2,28	4,08 \pm 0,34	25,80 \pm 2,72	10,56 \pm 1,48	3,30 \pm 0,34	2,02 \pm 0,11
Efeito	ns	ns	ns	ns	-*L	ns
-----Milho (2005/06)-----						
0	25,91 \pm 1,81	3,07 \pm 0,34	18,76 \pm 1,84	5,58 \pm 0,96	3,94 \pm 1,01	1,35 \pm 0,19
3	26,48 \pm 1,72	3,59 \pm 0,93	20,60 \pm 2,46	5,80 \pm 0,85	4,00 \pm 0,85	1,93 \pm 0,39
6	26,07 \pm 1,79	3,13 \pm 0,27	19,96 \pm 3,33	6,36 \pm 1,34	3,92 \pm 0,90	1,58 \pm 0,26
9	26,79 \pm 1,02	3,15 \pm 0,43	20,47 \pm 3,22	6,45 \pm 1,09	3,98 \pm 0,84	1,91 \pm 0,45
Efeito	ns	ns	ns	*L	ns	*L
-----Trigo (2006)-----						
0	12,58 \pm 1,09	2,19 \pm 0,20	15,68 \pm 3,15	1,61 \pm 0,25	0,94 \pm 0,12	0,87 \pm 0,11
3	12,43 \pm 1,09	2,07 \pm 0,17	15,55 \pm 3,87	1,70 \pm 0,11	0,88 \pm 0,17	0,94 \pm 0,10
6	11,96 \pm 1,19	2,30 \pm 0,24	16,04 \pm 2,24	1,86 \pm 0,33	0,87 \pm 0,23	0,93 \pm 0,11
9	12,32 \pm 1,28	2,17 \pm 0,34	15,39 \pm 2,24	1,75 \pm 0,19	0,83 \pm 0,19	0,97 \pm 0,12
Efeito	ns	ns	ns	*L	ns	ns
-----Soja (2006/07)-----						
0	52,20 \pm 3,59	4,81 \pm 0,33	25,46 \pm 4,14	9,73 \pm 1,06	3,29 \pm 0,66	2,69 \pm 0,24
3	52,28 \pm 3,46	4,66 \pm 0,17	25,42 \pm 4,10	10,36 \pm 0,95	3,13 \pm 0,62	2,84 \pm 0,34
6	52,61 \pm 1,85	4,90 \pm 0,24	24,83 \pm 5,74	11,10 \pm 2,72	2,71 \pm 0,75	2,91 \pm 0,17
9	52,64 \pm 2,95	4,74 \pm 0,28	27,2 \pm 3,37	10,13 \pm 1,56	3,13 \pm 0,36	2,81 \pm 0,18
Efeito	ns	ns	ns	ns	ns	ns
-----Soja (2007/08)-----						
0	48,60 \pm 4,91	4,22 \pm 0,61	25,47 \pm 2,10	9,76 \pm 1,53	3,67 \pm 0,28	2,81 \pm 0,45
3	49,19 \pm 5,61	4,23 \pm 0,53	25,78 \pm 1,98	10,07 \pm 1,32	3,55 \pm 0,24	3,05 \pm 0,42
6	49,16 \pm 4,00	4,14 \pm 0,38	25,10 \pm 2,79	10,37 \pm 1,46	3,59 \pm 0,57	3,08 \pm 0,39
9	49,51 \pm 4,18	4,20 \pm 0,39	25,48 \pm 1,93	10,42 \pm 1,02	3,37 \pm 0,17	3,16 \pm 0,24
Efeito	ns	ns	ns	ns	-*L	ns
-----Aveia branca (2008)-----						
0	10,39 \pm 0,76	1,74 \pm 0,25	20,73 \pm 5,01	2,66 \pm 0,23	1,69 \pm 0,24	0,64 \pm 0,09
3	10,37 \pm 0,75	1,64 \pm 0,25	21,22 \pm 3,41	2,59 \pm 0,18	1,65 \pm 0,25	0,66 \pm 0,10
6	10,06 \pm 0,89	1,91 \pm 0,26	20,80 \pm 3,50	2,67 \pm 0,26	1,56 \pm 0,24	0,73 \pm 0,08
9	9,93 \pm 0,69	1,73 \pm 0,23	20,90 \pm 4,13	2,76 \pm 0,22	1,51 \pm 0,20	0,70 \pm 0,12
Efeito	ns	ns	ns	ns	-*L	ns
-----Soja (2008/09)-----						
0	48,71 \pm 2,62	3,75 \pm 0,30	24,38 \pm 3,49	9,33 \pm 1,66	3,26 \pm 0,40	2,50 \pm 0,18
3	47,88 \pm 3,98	3,39 \pm 0,21	23,10 \pm 2,29	9,74 \pm 1,52	2,96 \pm 0,28	2,48 \pm 0,35
6	49,08 \pm 2,90	3,69 \pm 0,24	24,14 \pm 3,10	9,33 \pm 1,16	3,04 \pm 0,38	2,72 \pm 0,19
9	49,10 \pm 3,08	3,66 \pm 0,32	23,56 \pm 2,16	9,07 \pm 1,34	2,85 \pm 0,29	2,64 \pm 0,23
Efeito	ns	ns	ns	ns	-*L	*L

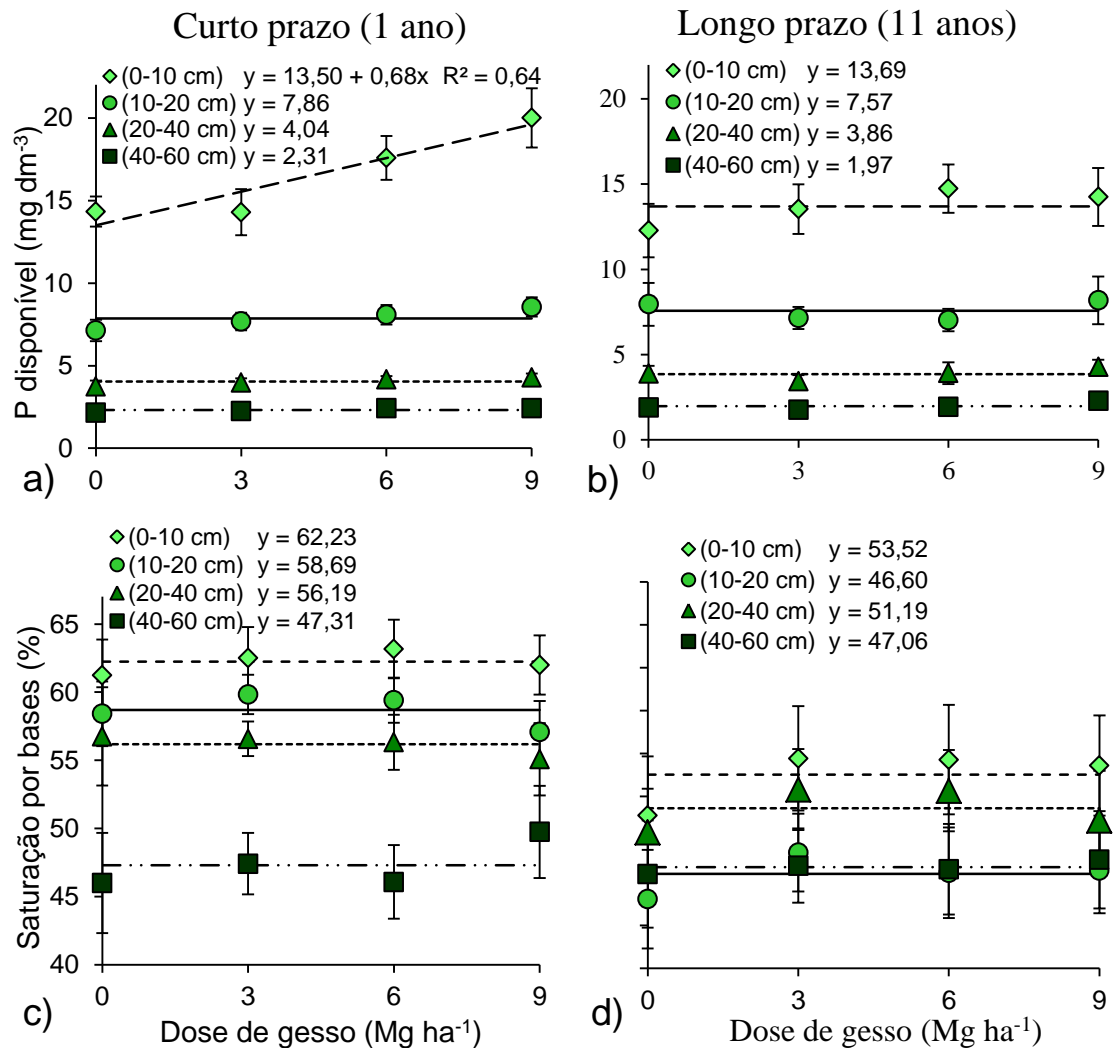
ns = Não significativo; *L = Efeito positivo linear; -*L = Efeito negativo linear.

7. Correlação linear de Pearson entre o teor de nutrientes foliares e o rendimento relativo de grãos de seu respectivo cultivo conduzidos em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR.

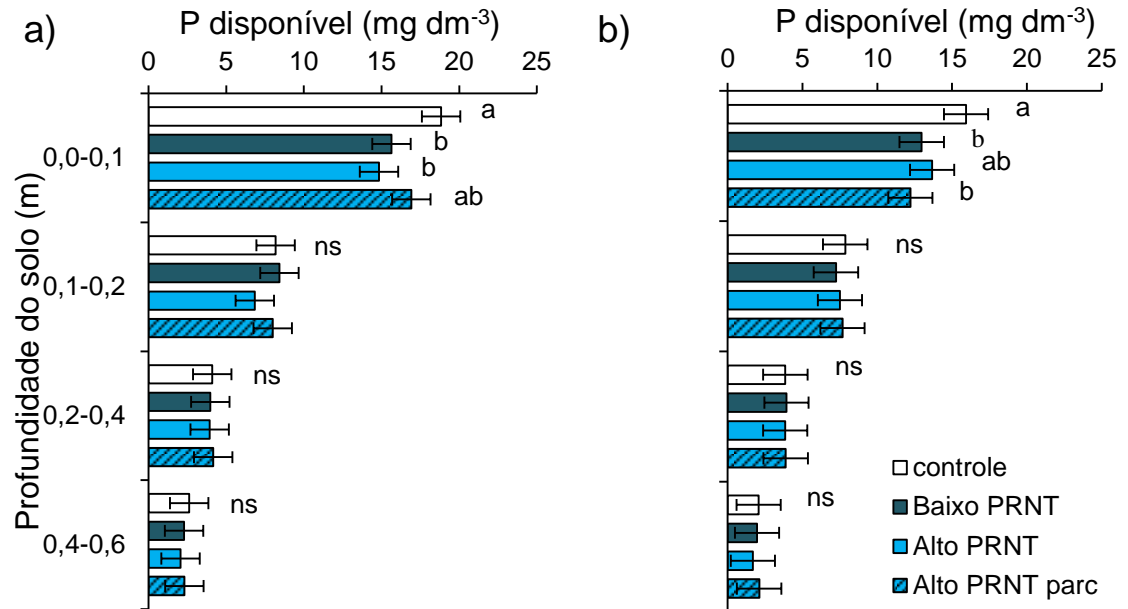
Cultura/ano	N	P	K	Ca	Mg	S
Aveia Branca (2004)	0,29*	0,32*	0,19 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,37**	0,13 ^{ns}
Soja (2004/2005)	0,03 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,28 ^{ns}	-0,15 ^{ns}
Milho (2005/2006)	0,10 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,11 ^{ns}
Trigo (2006)	0,21 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,00 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,34**
Soja (2006/2007)	0,59**	0,39**	-0,05 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,28 ^{ns}
Soja (2007/2008)	0,67**	0,39**	-0,01 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,42**
Aveia branca (2008)	0,08 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Soja (2008/2009)	0,53**	0,02 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,12 ^{ns}

ns = Não significativo; * p < 0,05; ** p < 0,01; n = 48.

8. Teores de P disponível (a, b) e valores de saturação por bases (c, d) a curto (1 ano) e longo prazo (11 anos) após a aplicação de gesso agrícola em um Latossolo sob sistema plantio direto em Guarapuava, PR. Barras de erro são os valores de desvio padrão, n = 12.



9. Teor de P disponível no solo a curto (1 ano) (a) e longo prazo (11 anos) (b) após aplicação superficial de calcário de baixo e alto poder relativo de neutralização total (PRNT) em um Latossolo sob plantio direto em Guarapuava, PR. Barras de erros são os valores de diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



RESUMO BIBLIOGRÁFICO

Osmar Henrique de Castro Pias, filho de Osmar da Silva Pias (*in memoriam*) e Sirlei de Castro Pias, nasceu em 31 de outubro de 1992, em Palmeira das Missões, Rio Grande do Sul. Realizou todo o ensino fundamental em escolas públicas no mesmo município. No ano de 2007 ingressou na Escola Estadual Técnica Celeste Gobbato de Palmeira das Missões, para realização do ensino médio integrado ao curso Técnico em Agropecuária, no qual se formou em 2009. Em 2010 iniciou seu curso de graduação em Engenharia Agrônoma na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), campus de Frederico Westphalen, vindo a graduar-se no ano de 2014. Em 2015, na mesma instituição deu início ao curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Agricultura e Ambiente, sob orientação do professor Claudir José Basso, completando o curso no mesmo ano. Em 2016, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em nível de doutorado, sob orientação do professor Cimélio Bayer. No ano de 2018, com liberação do PPGCS da UFRGS, tornou-se professor do curso de Agronomia da Universidade Luterana do Brasil (ULBRA). E no ano de 2019, tornou-se professor efetivo do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico (E.B.T.T.) do Instituto Federal Farroupilha, campus de Júlio de Castilhos. Durante sua carreira acadêmica publicou 29 artigos científicos em revistas nacionais e internacionais indexadas à área das Ciências Agrárias, foi coautor de três capítulos de livros e publicou mais de 30 resumos em eventos científicos no Brasil.