

FERNANDO MARCOS BRIGNOLI

**EFETIVIDADE DO GESSO AGRÍCOLA NO APROVEITAMENTO DE FÓSFORO E
NA RESISTÊNCIA À RESTRIÇÃO HÍDRICA PELA CULTURA DA SOJA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Coorientador: Prof. Dr. Jackson Adriano Albuquerque
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Cezar Cassol

Lages, SC
2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Brignoli, Fernando Marcos
Efetividade do gesso agrícola no aproveitamento de
fósforo e na resistência à restrição hídrica pela cultura da soja
/ Fernando Marcos Brignoli. -- 2020.
87 p.

Orientador: Luciano Colpo Gatiboni
Coorientador: Jackson Adriano Albuquerque
Coorientador: Paulo Cezar Cassol
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages,
2020.

1. Sulfato de cálcio. 2. Adubação fosfatada. 3. Estresse
hídrico. I. Colpo Gatiboni, Luciano . II. Adriano Albuquerque,
Jackson . Cezar Cassol, Paulo . III. Universidade do Estado
de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

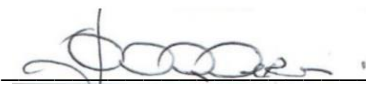
FERNANDO MARCOS BRIGNOLI

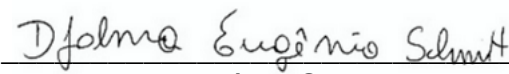
**EFETIVIDADE DO GESSO AGRÍCOLA NO APROVEITAMENTO DE FÓSFORO E
NA RESISTÊNCIA À RESTRIÇÃO HÍDRICA PELA CULTURA DA SOJA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Banca examinadora:

Orientador: 
Professor Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro: 
Professor Dr. Paulo Roberto Ernani
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro: 
Professor Dr. Djalma Eugênio Schmitt
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Lages, SC, 31 de julho de 2020

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Juliano e minha mãe Ivonete, por todo o amor, compreensão, incentivo e apoio incondicional. À minha querida irmã Franciele, por todo o carinho.

Ao meu tio Jorge, pelo companheirismo e pela confecção dos trados amostradores de solo, assim como os demais instrumentos necessários no campo.

Ao professor Luciano Colpo Gatiboni, pela orientação prestada e pelos ensinamentos passados em suas disciplinas.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Solos de Santa Catarina (GEFOSC), pelo apoio e auxílio durante as análises químicas.

Aos demais colegas de pós-graduação, pela amizade e companheirismo.

Aos professores dos Programas de Pós Graduação em Ciência do Solo e Produção Vegetal, pelos conhecimentos adquiridos nas disciplinas ministradas.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação e estrutura concedida.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, à PROMOP e CAPES pela concessão das bolsas de estudo.

À professora Analú Mantovani, por disponibilizar a estrutura e os equipamentos da Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC) para a realização de algumas análises químicas de solo.

A todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“A escolhas mais difíceis requerem as
vontades mais fortes.”
(Thanos - Marvel Comics)

RESUMO

Brignoli, Fernando Marcos. **Efetividade do gesso agrícola no aproveitamento de fósforo e na resistência à restrição hídrica pela cultura da soja**. 2020, 87 p. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Área: Fertilidade e Química do solo. Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias, Lages, 2020.

O gesso agrícola é amplamente utilizado na agricultura com a função principal de melhorar as propriedades químicas do solo em profundidade, tornando-o mais adequado para o desenvolvimento das plantas. Dentre as principais problemáticas que envolvem a agricultura brasileira encontra-se a baixa eficiência da adubação fosfatada e as estiagens que comprometem o rendimento das culturas. O gesso agrícola tem sido apontado como uma alternativa para melhorar o uso do fósforo no solo e atenuar os efeitos de estresse hídrico devido às alterações químicas que influenciam o crescimento radicular. Os objetivos do estudo foram avaliar a influência do gesso no aproveitamento de fertilizante fosfatado e na atenuação dos efeitos da restrição hídrica na soja. Dois experimentos foram realizados em um Cambissolo Húmico na Fazenda Experimental do CAV/UFSC, localizada em Lages-SC. O primeiro experimento constituiu-se de quatro doses de fósforo (0, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅) associadas ao uso e ausência de gesso, onde duas safras de soja foram avaliadas entre 2017 e 2019. O segundo experimento avaliou o uso de gesso (com e sem) em duas condições de água no solo (com e sem restrição hídrica), cultivando-se soja no ano agrícola de 2018/19. Em ambos os experimentos a dose de gesso utilizada foi de 1400 kg ha⁻¹. Foram avaliados o rendimento da cultura, a exportação de nutrientes e atributos do sistema radicular, além da análise do solo nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm. A aplicação de gesso agrícola não influenciou no aproveitamento do fósforo, porém houve incremento de produtividade com o aumento da dose de fósforo e uso de gesso no primeiro ano de cultivo. As doses de fósforo aumentaram o teor deste nutriente na camada de 0-10 cm, enquanto o uso de gesso promoveu maior teor de cálcio e menor de magnésio na mesma camada, além de aumento de sulfato em todo o perfil. O uso de gesso não aumentou a produtividade da soja sob restrição hídrica, mas o rendimento foi menor nesta condição. Em ambos os experimentos os atributos do sistema radicular não foram influenciados pelos tratamentos. Em virtude dos resultados obtidos, o uso de gesso agrícola não melhorou o aproveitamento de fósforo, tampouco aumentou a produtividade da soja sob restrição hídrica.

Palavras-chave: Sulfato de cálcio. Adubação fosfatada. Estresse hídrico. *Glicine max*.

ABSTRACT

Brignoli, Fernando Marcos. **Effectiveness of gypsum on the use of phosphorus and resistance to water restriction by soybean**. 2020, 87 p. Dissertation (Master's Degree in Soil Science). Area: Fertility and Soil Chemistry. Santa Catarina State University, Lages, 2020.

Agricultural gypsum is widely used in agriculture with the main function of improving the chemical properties of the soil in depth, making it more suitable for plant development. Among the main problems involving Brazilian agriculture is the low efficiency of phosphate fertilization and droughts, compromising crop yields. Gypsum has been pointed out as an alternative to improve the use of soil phosphorus and to attenuate the effects of water stress due to the chemical changes that influence the root growth. The objectives of the study were to evaluate the influence of gypsum on the use of phosphate fertilizer and on the mitigation of the effects of water restriction on soybean. Two trials were carried out in a Humic Cambisol at the Experimental Farm of CAV/UDESC, located in Lages-SC. The first experiment consisted of four rates of phosphorus (0, 50, 100 and 200 kg ha⁻¹ of P₂O₅) associated with the use and absence of gypsum, where two soybean crop seasons were evaluated between 2017 and 2019. The second trial tested the use of gypsum (with and without) in two soil water conditions (with and without water restriction). I was tested soybean in the 2018/19 crop season. In both trials the gypsum rate used was 1400 kg ha⁻¹. It were evaluated the crop yield, nutrient export, and attributes of the root system, in addition to soil analysis in the layers 0 to 10, 10 to 20, 20 to 30 and 30 to 40 cm. The application of agricultural gypsum did not influence the use of phosphorus, but there was an increase in productivity with the increase in the rate of phosphorus and use of gypsum during the first year of cultivation. The rates of phosphorus increased soil P in the 0 -10 cm soil layer, while the use of gypsum promoted a higher content of calcium and less magnesium on the same layers, in addition to an increase in sulfate throughout the profile. The use of gypsum did not increase soybean productivity under water restrictions, but the yield was lower in this condition. In both trials, the attributes of the root system were not influenced by the treatments. Due to the results obtained, the use of agricultural gypsum did not improve the use of phosphorus, nor increase the productivity of soybean under water restriction conditions.

Keywords: Calcium sulphate. Phosphate fertilization. Water stress. *Glicine max*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da área experimental.....	33
Figura 2 – Precipitação, temperaturas máximas e mínimas mensais durante o período experimental (nov/2017 - abr/2019) e precipitação histórica média (1989 – 2019) no município de Lages, SC.....	33
Figura 3 – Produtividade da soja no ano agrícola 2017/18 em função das doses de P_2O_5 (a) e do manejo de gesso (b).....	41
Figura 4 – Teor de fósforo (Mehlich 1) em função da dose de P_2O_5 aplicada.....	48
Figura 5 – Teores de cálcio e magnésio na camada de 0-10 cm em função do manejo de gesso.....	49
Figura 6 – Teores de sulfato no solo em função do manejo de gesso.....	50
Figura 7 – pH- H_2O na camada de 30-40 cm em função do manejo de gesso.....	51
Figura 8 – Teor de fósforo (Mehlich 1) em função do manejo de gesso agrícola na camada de 20-30 cm.....	67
Figura 9 – Teor de fósforo (Mehlich 1) na camada de 10-20 cm em função da condição hídrica imposta.....	68
Figura 10 – Teor de enxofre no solo nas camadas de 10-20, 20-30 e 30-40 cm em função do manejo de gesso agrícola.....	70
Figura 11 – pH- H_2O na camada de 30-40 cm em função do manejo de gesso agrícola sem restrição hídrica.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo da análise de variância (p-valor) para os componentes de rendimento, exportação e teor de nutrientes nos grãos de soja em função da dose de P ₂ O ₅ , manejo do gesso e interação entre os fatores de variação.....	34
Tabela 2 - Teores de nutrientes nos grãos em função da dose de P ₂ O ₅	42
Tabela 3 - Exportação de nutrientes em função do manejo de gesso e das doses de P ₂ O ₅ ano agrícola 2017/18.....	43
Tabela 4 - Resumo da análise de variância (p-valor) para os atributos químicos do solo em função da dose de P ₂ O ₅ , manejo do gesso e interação entre os fatores de variação após 15 meses da aplicação de gesso agrícola.....	45
Tabela 5 - Média dos atributos químicos solo por camada analisada.....	47
Tabela 6 - Resumo da análise de variância (p-valor) para os atributos radiculares da soja em função da dose de P ₂ O ₅ , manejo do gesso e interação entre os fatores de variação.....	52
Tabela 7 - Médias dos atributos radiculares da soja no ano agrícola 2018/19.....	53
Tabela 8 - Umidade volumétrica do solo do solo (m ³ m ⁻³) durante os estágios fenológicos da soja em função da condição hídrica imposta.....	60
Tabela 9 - Umidade volumétrica do solo do solo (m ³ m ⁻³) em função da camada de solo analisada.....	61
Tabela 10 - Resumo da análise de variância (p-valor) para rendimento, peso de mil grãos (PMG), altura de planta e exportação de nutrientes nos grãos em função do manejo de gesso, condição hídrica e interação entre os fatores de variação.....	61
Tabela 11 - Rendimento, altura de planta e P exportado em função da condição hídrica imposta.....	62
Tabela 12 - Resumo da análise de variância (p-valor) para os teores de nutrientes e alumínio nas camadas de solo em função do manejo de gesso, condição hídrica e interação entre os fatores de variação.....	64
Tabela 13 - Média dos atributos químicos solo por camada analisada.....	66

Tabela 14 - Resumo da análise de variância (p-valor) para os atributos radiculares da soja da safra 2018/19 em função do manejo de gesso, condição hídrica e interação entre os fatores de variação.....	71
Tabela 15 - Médias dos atributos radiculares em função da camada de solo analisada.....	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	18
2 HIPÓTESES.....	20
3 OBJETIVOS.....	21
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
4.1 DINÂMICA DO FÓSFORO NA RELAÇÃO SOLO-PLANTA.....	22
4.2 ESCASSEZ DE FÓSFORO.....	24
4.3 GESSO AGRÍCOLA.....	25
4.4 GESSO AGRÍCOLA E ESTRESSE HÍDRICO.....	26
4.5 INTERAÇÃO FÓSFORO E GESSO AGRÍCOLA.....	27
5 CAPÍTULO 1: RESPOSTA DA SOJA E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA ASSOCIADA À APLICAÇÃO DE GESSO AGRÍCOLA.	30
5.1 RESUMO.....	30
5.2 INTRODUÇÃO.....	31
5.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
5.3.1 Localização e características da área experimental.....	32
5.3.2 Histórico de adubação da área experimental.....	33
5.3.3 Implantação e descrição dos tratamentos.....	34
5.3.4 Primeiro cultivo de soja e avaliações.....	34
5.3.5 Primeiro cultivo de inverno: Aveia-preta.....	35
5.3.6 Segundo cultivo de soja e avaliações.....	36
5.3.7 Amostragem de solo e análises.....	36
5.3.8 Análise do sistema radicular da soja.....	37
5.3.9 Segundo cultivo de inverno: Canola.....	37
5.3.10 Eficiência de uso do fósforo.....	38
5.3.11 Análises estatísticas.....	38

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.4.1 Rendimento, exportação e teor de nutrientes nos grãos de soja do ano agrícola 2017/18	40
5.4.2 Eficiência de uso de fósforo para a safra 2017/18	44
5.4.3 Rendimento, exportação e teor de nutrientes nos grãos de soja do ano agrícola 2018/19	44
5.4.4 Atributos químicos do solo	45
5.4.4.1 Teor de fósforo.....	47
5.4.4.2 Teores de cálcio e magnésio	48
5.4.4.3 Teor de sulfato	49
5.4.4.4 pH do solo.....	50
5.4.5 Análises dos atributos radiculares da soja no ano agrícola 2018/19.....	52
5.5 CONCLUSÕES.....	53
6 CAPÍTULO 2: RESPOSTA DA SOJA E DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES EM FUNÇÃO DO MANEJO DE GESSO AGRÍCOLA E CONDIÇÃO HÍDRICA	53
6.1 RESUMO	53
6.2 INTRODUÇÃO.....	54
6.3 MATERIAL E MÉTODOS	56
6.3.1 Localização e características do solo.....	56
6.3.2 Histórico da área experimental e implantação dos tratamentos	56
6.3.3 Cultivo de soja e avaliações	57
6.3.4 Amostragem de solo e análises	58
6.3.5 Análise do sistema radicular da soja	58
6.3.6 Monitoramento da umidade do solo	59
6.3.7 Análises estatísticas.....	59
6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
6.4.1 Eficácia do sistema de exclusão de água.....	60
6.4.2 Parâmetros de rendimento e exportação de nutrientes	61

6.4.3 Análise química do solo sete meses após a aplicação de gesso agrícola	63
6.4.3.1 Teor de fósforo	66
6.4.3.2 Teor de sulfato	69
6.4.3.3 pH-H ₂ O.....	70
6.4.4 Atributos radiculares da soja	71
6.5 CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICES	84

1 INTRODUÇÃO GERAL

O manejo adequado do solo promove melhorias nas condições edáficas devido às alterações de âmbito químico, físico e biológico. Como consequência, há melhorias na capacidade do solo em sustentar o sistema produtivo de forma eficiente e ao mesmo tempo sustentável. Assim, o uso de estratégias que visam aprimorar os sistemas de produção agrícola é fundamental para o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, como a água e os nutrientes.

O fósforo (P) é um dos nutrientes essenciais às plantas, presente normalmente em quantidades insuficientes nos solos brasileiros. O nutriente apresenta forte interação com a fase sólida do solo em função das reações de adsorção que diminuem a sua disponibilidade. Com isso, torna-se necessário aplicar altas quantidades de fertilizantes para que os teores fiquem adequados para o desenvolvimento de determinada cultura. Até o ano de 2017, cerca de 62% do P inorgânico utilizado no Brasil como fertilizante era importado (FAO, 2020), deixando o país vulnerável aos custos de importação. Aliado a isso, as pesquisas recentes apontam para uma futura escassez de P por conta do esgotamento das reservas mundiais. Embora ainda não haja dados que estabeleçam a quantidade real de fosfatos disponível, existe uma preocupação no meio agrícola para a busca de alternativas que melhorem a eficiência de uso do P.

Dentre as formas de aprimorar o aproveitamento da adubação fosfatada encontra-se a aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Este produto é um condicionador de solo que quando solubilizado permite um melhor desenvolvimento do sistema radicular pelo fornecimento de cálcio (Ca) em profundidade e diminuição da toxidez por alumínio (Al), tornando maior o volume de solo explorado pelas raízes. O P apresenta baixa mobilidade no solo, sendo absorvido predominantemente por difusão e as alterações químicas provocadas pela gessagem permitem o acesso das raízes às regiões do solo que normalmente não seriam exploradas, contribuindo para o melhor aproveitamento da adubação fosfatada.

Outro benefício relatado na literatura decorrente da utilização de gesso agrícola é a amenização dos prejuízos causadas por períodos de estresse hídrico, principalmente em solos com ocorrência de acidez subsuperficial. Nessas situações, alguns trabalhos relatam respostas positivas das culturas ao fornecimento de gesso, dentre elas a soja. No entanto, são necessárias pesquisas mais aprofundadas em

relação aos fatores químicos e a dinâmica dos nutrientes no solo em condições de restrição hídrica.

2 HIPÓTESES

A aplicação de gesso agrícola melhora os atributos químicos do solo em subsuperfície e, conseqüentemente, aumenta a eficiência de aproveitamento do fósforo através da redução da necessidade de adubação fosfatada para a cultura da soja.

Sob a condição de restrição hídrica, a cultura da soja apresenta maior rendimento quando há aplicação de gesso agrícola no solo, em função da melhoria dos atributos químicos do solo em subsuperfície.

Sob condição de restrição hídrica há melhor aproveitamento de fósforo sob manejo com gesso agrícola em função da melhoria dos atributos químicos do solo em subsuperfície.

3 OBJETIVOS

Avaliar a influência da aplicação de gesso no aproveitamento da adubação fosfatada na cultura da soja.

Verificar se em condição de restrição hídrica a aplicação de gesso aumenta a produtividade da cultura da soja, pela melhoria dos atributos químicos do solo em subsuperfície.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 DINÂMICA DO FÓSFORO NA RELAÇÃO SOLO-PLANTA

O P é essencial nos processos metabólicos das plantas, sendo componente estrutural de ácidos nucleicos, fosfolipídios, molécula de ATP e coenzimas (BUCHER et al., 2018). No solo o P pode estar presente em formas orgânicas e inorgânicas e as proporções de cada uma se alteram à medida que o intemperismo do solo avança (GATIBONI et al., 2013; WALKER & SYERS, 1976). Na solução do solo o P ocorre nas formas de ortofosfatos H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-} , as quais são absorvidas pelas plantas com o predomínio de H_2PO_4^- nos solos mais ácidos (HAVLIN et al., 2005). A concentração na solução (fator intensidade) depende das reações de adsorção específica e de precipitação, ambas influenciadas pelo pH (ERNANI, 2016).

A disponibilidade de P também é regida pelo poder tampão (fator capacidade) do solo em manter constantes os níveis do nutriente na solução. Esta fração de P que abastece a solução pelo mecanismo de dessorção é chamada de P lábil e está ligada aos coloides com uma energia mais baixa. Entretanto, a energia de ligação não é constante e aumenta com o decorrer do tempo em função da alta afinidade do P pelos oxihidróxidos de ferro e alumínio dos minerais de argila, diminuindo a capacidade de reposição de P na solução e comprometendo a disponibilidade para as plantas (FINK et al., 2016; MARCOLAN, 2006).

Segundo Novais & Smyth (1999) o processo de adsorção de P acontece em duas fases. Na primeira, há troca de ligantes, em que o radical hidroxila é substituído pelo ânion fosfato. Em um segundo momento e de forma mais lenta, o fosfato penetra nas imperfeições do mineral, tornando-o não-lábil e praticamente sem equilíbrio com a solução do solo.

Os solos tropicais e subtropicais do Brasil são, em sua maioria, naturalmente ácidos em função do seu elevado grau de intemperismo (MOTTA & MELO, 2019), conferindo grande capacidade de adsorção de P nos minerais de argila, dentre eles, caulinita, goethita e hematita (SHEN et al., 2011; PARFITT, 1978) e também em minerais do tipo 2:1 com hidróxidos de alumínio na entrecamada (CANER et al., 2014). Para que estes solos possam garantir o desenvolvimento normal das plantas e proporcionar resultados produtivos satisfatórios, é necessária a aplicação de

fertilizantes fosfatados, além da adoção de manejos que proporcionem melhorias no aproveitamento do fertilizante utilizado (BALEMI & NEGISHO, 2012).

Algumas práticas como a aplicação de calcário para reduzir a acidez (ERNANI et al., 2001), implantação do sistema de plantio direto sem o revolvimento do solo, introdução de plantas de cobertura para ciclagem de fósforo (GATIBONI 2003; RHEINHEIMER et al., 2019), aplicação localizada de fertilizantes (ROSOLEM & MERLIN, 2014), utilização de ácidos húmicos pela ação competidora por sítios de adsorção (ROSA et al., 2019) e aplicação de condicionadores de solo para alterar a morfologia radicular e melhorar a exploração do solo pelas raízes (GOEDERT & SOUSA, 1984) são exemplos de formas de otimizar o uso de P na agricultura.

A concentração de P na solução do solo varia de 10^{-4} a 10^{-6} mol L⁻¹, podendo chegar a 10^{-8} M nos solos mais intemperizados de baixa fertilidade. Essas concentrações estão relacionadas à capacidade do solo em reabastecer a solução mantendo o equilíbrio, à quantidade de P na solução e à intensidade de absorção pelas culturas (SYERS et al., 2008).

Pelas fortes reações com os componentes do solo, o P é fornecido para as raízes das plantas principalmente por difusão (MIKKELSEN, 2015). Para que o P chegue às raízes pelo fluxo difusivo é necessário um teor de P solúvel maior próximo às partículas do solo do que junto às raízes, sendo esse mecanismo promovido pela depleção formada na região ao redor das raízes, gerando um gradiente químico. Este processo ainda é altamente dependente do teor de água no solo, meio no qual a difusão ocorre (NOVAIS & SMYTH, 1999).

Devido à baixa mobilidade no solo, a absorção de P tem grande dependência da exploração de um maior volume do solo pelas raízes, sendo que uma das primeiras respostas morfológicas das plantas à escassez ou baixa disponibilidade de P é a alteração da arquitetura radicular (BUCHER et al., 2018). Sistemas radiculares mais extensos aumentam o contato entre as raízes e o solo. Com isso, a absorção de P está estreitamente relacionada com o comprimento radicular e a forma com que as raízes estão distribuídas entre as camadas do solo, sendo que a capacidade de exploração do solo varia conforme a espécie vegetal (ARAÚJO & MACHADO, 2006). Entre as plantas cultivadas, a soja é a que apresenta menor densidade de raízes, enquanto as pastagens perenes os maiores valores (BARBER, 1984). Por outro lado, sob baixas concentrações de P na solução, a soja é a planta que desempenha maior absorção ao compará-la com gramíneas (SCHONINGER et al., 2013). De acordo com

Havlin et al. (2005), o crescimento radicular apresenta as maiores concentrações nas regiões do solo com os teores mais elevados. A baixa disponibilidade de P também altera a distribuição das raízes (HODGE et al., 2009). Sob condições de deficiência de P algumas espécies aumentam a relação raiz:parte aérea, devido ao estímulo do sistema radicular em buscar locais com maior disponibilidade (SOUSA et al., 2010). Outra estratégia é a emissão de raízes laterais e de pêlos radiculares que melhoram a eficiência de exploração do solo em função do pequeno raio (LYNCH, 2007). A absorção de P é gravemente afetada pela presença de alumínio (Al), o que gera formas menos disponíveis às raízes, diminuindo a respiração celular destas, afetando conseqüentemente a absorção de água e outros nutrientes indiretamente (NICHOL & OLIVERA, 1995).

4.2 ESCASSEZ DE FÓSFORO

O crescimento populacional e conseqüente aumento da produção de alimentos tem aumentado a demanda de fertilizantes no mundo, em especial aos fosfatados (FINK et al., 2016). Segundo os dados da FAO (2020) entre 2015 e 2019 houve um aumento de 2,19 % na taxa de consumo de fósforo para a produção de fertilizantes no mundo. A preocupação atual é de que as reservas de P, com maior concentração no continente africano (De BOER et al., 2019) apresentam fornecimento limitado e que o esgotamento das jazidas possa ocorrer em poucos séculos se a demanda continuar no ritmo atual. Entretanto, as estimativas de esgotamento entre os diferentes estudos e a metodologia utilizada por eles varia, sendo que muitos se baseiam em dados de produção ultrapassados (PANTANO et al., 2016).

O Brasil é um dos principais consumidores de fosfato para a fabricação de fertilizantes no mundo e a maior parte da matéria-prima utilizada é importada, deixando o país vulnerável aos custos de importação. Além disso, com a intensificação da produção agrícola no país, a quantidade de P aplicada aumenta, devido a demanda nutricional das plantas e principalmente pela grande imobilização do nutriente na maioria dos solos brasileiro (WITHERS et al., 2018).

Mediante o cenário de esgotamento das jazidas e redução da oferta de fosfatos aliada à crescente demanda de P na agricultura, tem-se buscado por alternativas com o intuito de aprimorar o manejo e aumentar a eficiência de uso de P em áreas agrícolas (RHEINHEIMER et al., 2019), como reciclagem de P a partir de dejetos de animais,

remoção e obtenção deste nutriente em ambientes eutrofizados e uso de novas técnicas no manejo de solo (SCHNEIDER et al., 2019; PANTANO et al., 2016), como a criação de um perfil de solo através do gesso agrícola.

4.3 GESSO AGRÍCOLA

O sulfato de cálcio, conhecido como gesso agrícola ou fosfogesso, é um subproduto da indústria dos fertilizantes fosfatados. Após o ataque da rocha fosfática, geralmente uma apatita com o ácido sulfúrico são obtidos o ácido fosfórico e o gesso (ALVAREZ et al., 1999). Em termos médios, o gesso apresenta de 17 a 20% de Ca, 14 a 17 % de enxofre (S) e quantidades de P (P_2O_5) e flúor (F) em torno de 0,6 e 0,7%, respectivamente. O gesso é um sal pouco solúvel em água ($2,5 \text{ g L}^{-1}$), mas a liberação dos íons constituintes na solução do solo é constante e pode ser utilizado na agricultura como fonte de Ca e S na forma de sulfato (SO_4^{2-}).

Uma das principais diferenças entre o gesso e o calcário é a incapacidade do primeiro em alterar o pH do solo. Entretanto, tem capacidade de atuar na subsuperfície de forma mais rápida. O calcário eleva o pH e aumenta a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo pela geração de hidroxilas. O Ca, assim como o Mg, é retido nas cargas elétricas originadas pela elevação do pH, diminuindo a mobilidade vertical do íon. Por outro lado, as reações de dissolução do gesso não geram cargas elétricas diretamente, permitindo que o Ca migre em profundidade (ERNANI, 2016), elevando a saturação por bases e diminuindo a saturação por alumínio (ZOCA & PENN, 2017).

Para Ernani (2016), o gesso pode atuar na diminuição da toxidez do Al de várias formas: i) pelo aumento de Ca na solução do solo, diminuindo a atividade do Al, e ii) aumentando a competição do Ca pelos sítios de absorção nas raízes e/ou permitindo a formação de par iônico não tóxico às plantas ($AlSO_4^+$). Contudo, o autor ressalta que por ser um sal neutro, o gesso não pode ser um substituto de corretivo de acidez, apesar de que em algumas situações a adição de gesso pode promover incremento no pH em baixa magnitude em função da substituição de hidroxilas pelo SO_4^{2-} nos sítios de adsorção específica.

Os trabalhos envolvendo a prática da gessagem como condicionador de ambiente radicular já eram amplamente discutidos nas décadas de 1970 e 1980 (SOUSA et al., 2007). Contudo, muitos estudos têm apresentado ênfase neste tema após a introdução do sistema de plantio direto (SPD), devido à realização da correção

da acidez do solo apenas nas camadas mais superficiais (CAIRES et al., 2003; BROCH et al., 2008), favorecendo um ambiente propício para o desenvolvimento radicular apenas nessas regiões (BORTOLUZZI et al., 2014).

Devido à função estrutural na parede celular, o Ca possui ampla quantidade de sítios de ligação nas células do tecido vegetal, tornando o transporte restrito na planta (LIMA et al., 2018). Em razão da absorção de Ca ocorrer especificamente pela coifa da raiz, a carência de Ca no solo nas proximidades dessa região prejudica o desenvolvimento radicular, visto que o nutriente não é transportado das raízes superficiais até as mais profundas (TAIZ & ZEIGER, 2009; PAULETTI et al., 2014). Dessa forma, o fornecimento de Ca em profundidade através da aplicação de gesso supre as necessidades e estimula o crescimento das raízes, permitindo a exploração de um maior volume para a absorção de outros nutrientes nestes locais, além de atenuar o estresse hídrico e insuficiências nutricionais nas plantas em veranicos (SOUSA et al., 2007; ALCÂNTARA et al., 2014). Para Sarmento et al. (2001) o uso de gesso agrícola pode aumentar a eficiência de adubos fosfatados por conta das reações de precipitação entre o Al e o SO_4^{2-} , melhorando o acesso das raízes ao P. Além disso, pelo fato de ser uma fonte de SO_4^{2-} barata e acessível (RHEINHEIMER et al., 2005), o gesso pode ser uma das formas de suprir este nutriente, principalmente às culturas de alta demanda, como a soja (CQFS-RS/SC, 2016).

4.4 GESSO AGRÍCOLA E ESTRESSE HÍDRICO

Os períodos de estiagem na região sul do Brasil, ocasionados pela irregularidade pluviométrica e elevada demanda atmosférica por água principalmente na primavera e verão, tem prejudicado o rendimento das culturas agrícolas. A ocorrência de deficiência hídrica é o principal risco climático das culturas produtoras de grãos (SENTELHAS et al., 2015).

As propriedades de agricultura familiar, assim como outras que não apresentam estruturas de irrigação e armazenamento de água para a produção, são as mais afetadas (FEE, 2013). Segundo os dados publicados pela CONAB (2020), a produção de soja no sul do país correspondente à safra 2019/2020 foi severamente afetada pela falta de chuvas, com redução de 12% em relação à produção do ano agrícola 2018/2019, sendo o estado do Rio Grande do Sul o mais prejudicado. Diante dessa problemática, muitas estratégias são estabelecidas para amenizar os problemas

causados pela deficiência hídrica. Se tratando de manejo de solo, a aplicação de gesso agrícola tem se mostrado uma alternativa (DALLA NORA & AMADO, 2013).

De acordo com Battisti e Sentelhas (2017), o déficit hídrico é o fator abiótico mais limitante para a produção de soja no Brasil. Considerando os vários aspectos envolvidos nas estratégias para minimizar os danos causados em períodos de seca, os autores verificaram que a conformação do sistema radicular exerce grande influência na produtividade, de modo que em locais atingidos pelo estresse hídrico, as plantas com melhor desenvolvimento de raízes em profundidade se sobressaem em relação às que apresentam desenvolvimento apenas nas regiões mais superficiais do solo. Ressalta-se que os danos são amenizados e não totalmente eliminados, sendo que os rendimentos em locais que passam por estiagens são inferiores ao de condições normais de disponibilidade de água, mesmo com raízes em profundidade.

Segundo um levantamento bibliográfico realizado por Tiecher et al. (2018), onde foram avaliados conjuntamente diversos estudos de campo, a resposta das principais culturas agrícolas à aplicação de gesso depende da condição hídrica durante o período de cultivo e da presença de acidez em subsuperfície. A taxa de mineralização da matéria orgânica é reduzida em períodos secos e o SO_4^{2-} proveniente da constituição do gesso pode ser uma fonte alternativa de S para as plantas nessas situações. Os autores relataram que a cultura do milho, independentemente do nível de acidez, responde positivamente ao manejo com gesso, justificada pela baixa CTC radicular da planta, ou seja, pela baixa capacidade de absorver cátions (PAULETTI et al., 2014). Por outro lado, a soja demonstra grande probabilidade de resposta ao gesso sob condições de baixa disponibilidade de água associada à acidez em profundidade (ZANDONÁ et al., 2015).

4.5 INTERAÇÃO FÓSFORO E GESSO AGRÍCOLA

Trabalhos encontrados na literatura brasileira que avaliam os efeitos do fósforo associado ao uso de gesso são, em sua maioria, provenientes de experimentos desenvolvidos sob Latossolos. A ordem dos Latossolos corresponde a um grupamento de solos com elevado grau de intemperismo, alta acidez e baixa saturação por bases. A mineralogia desses solos é constituída predominantemente por caulinita, além de óxidos e/ou hidróxidos de ferro e alumínio com alta capacidade de adsorção de P, resultando em níveis de exigência de fósforo mais elevados

(RHEINHEIMER et al., 2018; MOTTA et al., 2002). Essas características químicas podem conferir a este tipo de solo maiores probabilidades de respostas à adição de fertilizantes fosfatados, já que os níveis de fertilidade natural são baixos (PEREIRA et al., 2010). Por outro lado, os Cambissolos apresentam um grau de pedogênese mais incipiente, evidenciado pela presença de material de origem e fertilidade natural geralmente maior que os Latossolos (SANTOS et al., 2018). Neste escopo, informações sobre a dinâmica da interação entre a aplicação de gesso e fósforo em Cambissolos ainda são escassas.

A respostas das culturas de grãos ao manejo de gesso e adubação fosfatada são contrastantes. Queiroz (2005), ao avaliar as alterações químicas do solo e o rendimento da soja e sorgo implantados simultaneamente, verificou que na presença de gesso houve aumento linear do teor de P no solo em função da dose de P_2O_5 . Neste trabalho houve interação de gesso e doses de P apenas para a cultura do sorgo, de maneira que na presença de gesso a dose de P_2O_5 necessária para alcançar o maior rendimento (72kg ha^{-1}) foi menor que na ausência de gesso (114kg ha^{-1}), ou seja, a aplicação do condicionador permitiu a redução da dose necessária de P.

Segundo Broch et al. (2008), a aplicação simultânea de gesso e calcário se demonstra efetiva no aumento de produtividade da soja sob doses de fósforo. Infere-se que a correção da acidez na superfície ocorre devido a ação do calcário, enquanto o gesso atua diminuindo a atividade do alumínio em profundidade, melhorando a absorção de P.

A textura do solo também pode implicar na magnitude de disponibilidade de P no solo (NOVAIS; SMYTH 1999). Conforme verificado por Galetto (2016), comparando dois Latossolos de texturas diferentes, para uma mesma quantidade de P aplicada, a disponibilidade (Mehlich 1) foi superior em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa comparado a um Latossolo Vermelho argiloso, mesmo que os teores iniciais fossem maiores no segundo. Ainda neste trabalho, a aplicação de gesso acarretou aumento dos teores de Ca, P e S no tecido foliar nos tipos de solo. Foi verificada interação de gesso e P na produtividade de soja, com aumento de rendimento em função da elevação da dose de gesso nos menores níveis de P no solo; com altas doses de ambos houve diminuição da produtividade em razão de possíveis reações de precipitação entre P e Ca no solo.

Resende (2018) verificou incremento nos teores de P e Ca no solo com o aumento da dose de gesso até 8 t ha^{-1} , relacionando a elevação do teor de P em

função da composição química do gesso, com 0,6 % de P_2O_5 . Apesar disso, não foi verificada interação nos teores desses nutrientes nas folhas de milho, bem como na produtividade que apresentou efeito isolado, demonstrando comportamento quadrático para as doses de gesso e diferença para a maior dose de P em relação à testemunha com 80 e 0 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , respectivamente.

Milho e soja também foram estudados por Soares et al. (2018) e, embora os teores de Ca nas folhas tenham aumentado nas duas culturas com a aplicação de gesso, não foi verificado efeito na produtividade. Em decorrência do teor inicial de P na camada de 0-20 cm estar acima do nível crítico para a região do Cerrado (8 $mg\ dm^{-3}$) (SOUSA & LOBATO, 2004), o aumento das doses de P também não contribuíram para o incremento de rendimento.

A ocorrência de reações químicas mais complexas na interface entre a fase sólida e a solução do solo depende da combinação de determinados fatores como a natureza do íon, sua concentração e pH da solução. Em algumas situações, estas reações podem ser a explicação de um comportamento específico para um nutriente no solo, conforme explanado por Borges et al. (1998) ao obterem aumento de P na parte aérea da soja promovido pelas doses de gesso e inferir a maior disponibilidade de P em razão do deslocamento do íon fosfato pelo sulfato. Em condições de baixo pH, o ânion sulfato pode se ligar a fase sólida por complexo de esfera interna e competir com o fosfato pelos sítios de adsorção, mantendo-o por mais tempo na solução e disponível às plantas (ERNANI, 2016).

Embora existam respostas positivas ao uso conjunto de gesso e fósforo ou de pelo menos um dos fatores contribuir para o desenvolvimento das plantas, há relatos de resultados adversos. Silva (2019) verificaram aumento do número de ramos em café em função da adição de P, mas não resultou em vantagem para a cultura.

O intuito de melhorar o fornecimento de fósforo às plantas com a presença de gesso também é relatado para as forrageiras. Carvalho (2017) em um experimento com braquiária constatou efeito negativo para o aumento da dose de gesso sem a aplicação de P. A autora relata que a produção de massa seca das plantas é afetada por conta da formação de precipitados de fosfato de cálcio, diminuindo a disponibilidade de P às plantas. Verifica-se neste trabalho ainda, em pHs acima de 6,0, condições favoráveis para a ocorrência desta reação (PENN; CAMBERATO, 2019).

As diferentes fontes de fósforo podem apresentar desempenhos diferentes quando fornecidas na presença de gesso. Delistoianov et al. (1992), analisando a produção de massa seca total de uma pastagem consorciada de gramínea e leguminosas, verificou rendimento superior das plantas sob adubação com fosfato natural em relação ao superfosfato triplo, com ambas as fontes associadas ao manejo com gesso. Um ponto interessante e não discutido pelos autores foi a superioridade da fonte menos solúvel logo no primeiro ano de implantação. Esta resposta poderia estar atribuída ao maior fornecimento de cálcio às plantas pelo fosfato natural, diante do alto nível de acidez apresentado no experimento ou pela rápida formação de P não-lábil a partir da solubilização do superfosfato triplo, diminuindo a disponibilidade de P, conforme abordado por Sarmiento et al. (2001) ao observar aumento da produção de matéria seca de alfafa desenvolvida em solo com adição de gesso ao fosfato de Gafsa.

5 CAPÍTULO 1: RESPOSTA DA SOJA E ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA ASSOCIADA À APLICAÇÃO DE GESSO AGRÍCOLA.

5.1 RESUMO

O P apresenta elevada capacidade de adsorção na maioria dos solos brasileiros, o que reduz o aproveitamento do nutriente pelas plantas, tornando o sistema produtivo dependente de altas quantidades de fertilizantes fosfatados. Nesse contexto, o gesso agrícola pode ser uma alternativa para melhorar o aproveitamento da adubação fosfatada, em função da criação em perfil de solo mais fértil. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi verificar a influência da aplicação de gesso agrícola no aproveitamento da adubação fosfatada pela cultura da soja. O experimento foi iniciado no ano de 2017 em um Cambissolo Húmico na Fazenda Experimental do CAV/UEDESC, em Lages, que apresentava inicialmente baixos teores de P e Ca, além de alta M.O e acidez elevada. Os tratamentos foram compostos por quatro doses corretivas de P_2O_5 (0, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹) associadas ou não ao uso de gesso agrícola (0 e 1400 kg ha⁻¹) em esquema fatorial 4x2. Foi conduzida a cultura da soja nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, sendo avaliados os parâmetros de rendimento, produtividade, exportação de nutrientes e o sistema radicular no segundo cultivo. Os atributos químicos do solo

foram analisados nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e de 30 a 40 cm após 15 meses da aplicação de gesso. Não houve influência do gesso no aproveitamento de P, mas incremento de rendimento de forma isolada para o gesso e dose de P. O sistema radicular não foi influenciado pelo manejo de gesso. Houve aumento linear de P em relação às doses na camada superficial, bem como incremento de Ca e diminuição de Mg na superfície pelo uso de gesso, além do aumento de $S-SO_4^{2-}$ em todas as camadas avaliadas.

Palavras-chaves: Fertilizante fosfatado. Fosfogesso. Sulfato de cálcio. *Glicine max*.

5.2 INTRODUÇÃO

A dinâmica dos nutrientes no solo pode ser alterada em função do manejo. No sistema de plantio direto (SPD), caracterizado pela baixa mobilidade do solo, observa-se a formação de uma camada superficial com maior disponibilidade de nutrientes decorrente da aplicação de fertilizantes, correção da acidez sem incorporação e do acúmulo de matéria orgânica (CRUSCIOL et al., 2016; JORIS et al., 2013; SOUZA et al., 2016).

Dentre os nutrientes mais exigidos pelas plantas está o P. Devido à forte interação deste nutriente com os minerais silicatados e principalmente os oxihidróxidos de ferro (Fe) e Al, o P apresenta pouca disponibilidade na maioria dos solos. Assim, tornando-se necessário o aporte do nutriente através da aplicação de fertilizantes fosfatados, geralmente em altas quantidades para compensar as perdas por adsorção (GÉRARD, 2016; BARROW, 2015; ROY et al., 2016). A intensa utilização de fertilizantes fosfatados na agricultura e a elevada demanda futura podem levar ao esgotamento das fontes de fosfatos (WITHERS et al., 2018). Diante deste problema, existe a necessidade de implementar técnicas de manejo que melhorem eficientemente o aproveitamento das adubações, atenuando a dependência de fontes externas de fertilizantes.

Em função da mobilidade restrita no solo, o acesso das plantas ao P no solo é favorecido por um maior desenvolvimento de raízes (GIEHL & VON WIRÉN, 2014) e as características do sistema radicular das plantas determinam a capacidade de exploração do ambiente e aquisição do P (BURCHER et al., 2018). Apesar dos benefícios proporcionados pelo não revolvimento do solo no SPD, a elevada acidez em profundidade afeta o desenvolvimento radicular pela presença de Al tóxico

(FONTOURA et al., 2019; BORTOLUZZI et al., 2014) e conseqüentemente implica na absorção de P.

A ação de correção da acidez do calcário ocorre de maneira mais efetiva nas camadas superiores do solo (DEUS et al., 2020). Uma das alternativas para diminuir a toxidez por Al em profundidade é a aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), um sal neutro, condicionador de solo que fornecesse Ca e S e permite um melhor crescimento de raízes em profundidade (ERNANI, 2016).

Dessa forma, levando em consideração as modificações químicas do solo no SPD, a energia de ligação do P tende a ser baixa, aumentando a capacidade de dessorção (TIECHER et al., 2012). Nesse contexto, o manejo do solo com a aplicação de gesso agrícola poderia melhorar a eficiência de aproveitamento do P pela maior capacidade de exploração do solo proporcionada pelo insumo.

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

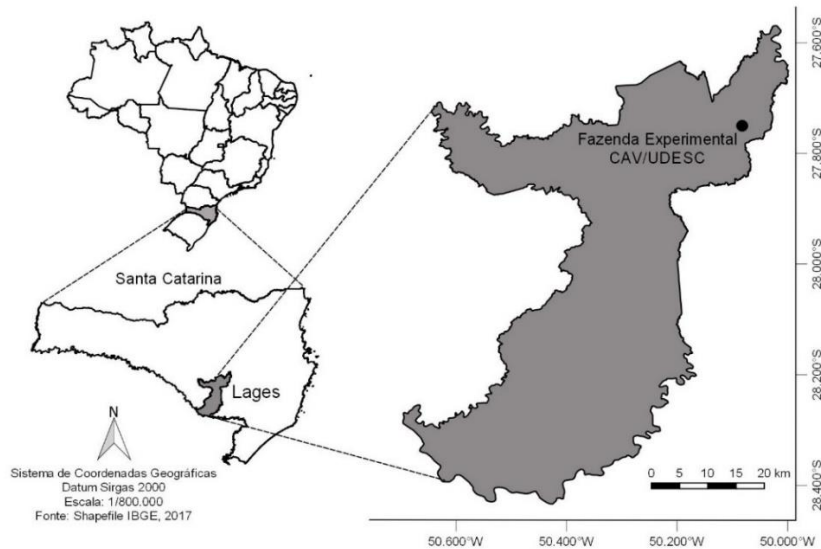
5.3.1 Localização e características da área experimental

O experimento teve início no ano de 2017 e foi conduzido em condições de campo na Fazenda Experimental do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UEDESC), no município de Lages, SC (27°44'54,11" de latitude Sul e 50°05'08,09" de longitude Oeste e 884 metros de altitude) (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen (ALVARES, et al., 2014), o clima do local é classificado como do tipo Cfb (mesotérmico úmido, com verão ameno). Os valores mensais de precipitação, bem como das temperaturas máximas e mínimas durante o período de execução do experimento estão apresentados na Figura 2.

O solo é classificado como Cambissolo Húmico Alítico típico (SANTOS et al., 2018), apresentando drenagem de boa a moderada (SANTOS et al., 2015) e as seguintes características obtidas na camada de 0-20 cm antes da instalação do experimento: 28% de argila; pH em água: 4,6; Índice SMP: 4,9; 5,1% de matéria orgânica; P disponível (Mehlich 1): 7,9 mg dm⁻³; K trocável: 186,8 mg dm⁻³; Al trocável: 2,9 cmol_c dm⁻³; Ca: 5,6 cmol_c dm⁻³; Mg: 3,2 cmol_c dm⁻³; H+Al: 15,6, soma de bases: 9,3; CTC efetiva e CTC pH 7,0: 12,2 e 24,9 cmol_c dm⁻³, respectivamente. As características apresentadas corroboram com as descritas por Almeida (2009) ao descrever os principais aspectos químicos dos solos dos Campos de Cima da Serra

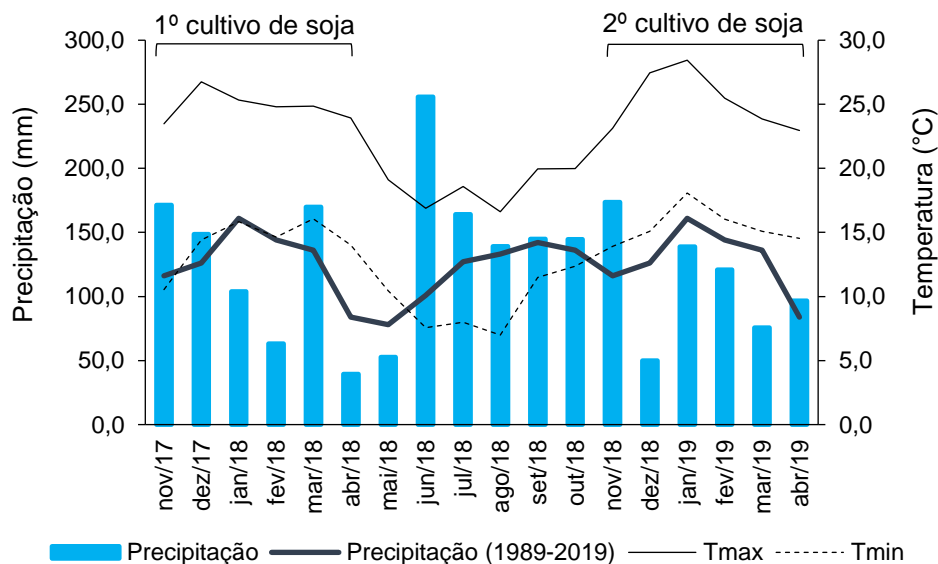
em Santa Catarina, como o pH baixo, presença de Al trocável, acúmulo de matéria orgânica (M.O), resultante do clima frio e úmido predominante na região.

Figura 1 – Localização geográfica da área experimental.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Figura 2 – Precipitação, temperaturas máximas e mínimas mensais durante o período experimental (nov/2017 - abr/2019) e precipitação histórica média (1989 – 2019) no município de Lages, SC.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2020, com dados fornecidos pela EPAGRI-CIRAM.

5.3.2 Histórico de adubação da área experimental

Na área de realização do estudo havia anteriormente um experimento com doses de P, implantado no ano de 2015. Naquele ano, primeiramente foi realizada a correção do solo com incorporação do calcário na camada de 0-20 cm com o objetivo de elevar o pH a 5,5, utilizando calcário dolomítico com PRNT de 90%, 29% e 19% de óxido de cálcio e magnésio, respectivamente, sendo posteriormente aplicadas quatro doses de P_2O_5 (0, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹) para a correção da disponibilidade de P, de forma localizada no sulco de semeadura das culturas. Os cultivos realizados foram o de trigo (2015), seguido de feijão (2015/16), trigo (2016) e milho (2016/17). Para cada cultura em sucessão ao primeiro cultivo de trigo foi realizada a adubação de manutenção a lanço para P e potássio (K) seguindo a recomendação indicada pela CQFS-RS/SC 2016. Após esse período a área permaneceu sob pousio.

Diante da remoção de P do sistema advindas da exportação pelos grãos das culturas, estimou-se com base nos rendimentos obtidos e teores extraídos pelos grãos a quantidade de P e K presentes no solo antes da implantação do experimento (Apêndice 1).

5.3.3 Implantação e descrição dos tratamentos

Em dezembro de 2017 foi implantado o experimento, aproveitando-se as parcelas correspondentes às doses de P_2O_5 aplicadas inicialmente em 2015. Conduzido sob o delineamento inteiramente casualizado com distribuição fatorial 4x2 e três repetições, os tratamentos constituíram-se das quatro doses de correção de P_2O_5 (0, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹) combinadas a dois manejos de gesso agrícola, com e sem a aplicação, sendo que cada parcela correspondeu à uma área de 8 m² (4 x 2 m).

A dose de gesso (DG) foi calculada de acordo com a fórmula $DG \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 50 \times \text{teor de argila (\%)} \text{ (SOUSA \& LOBATO, 2004)}$, resultando em 1400 kg ha⁻¹. Após o dimensionamento da dose para o tamanho das parcelas o material foi uniformemente distribuído na superfície do solo. O gesso agrícola apresentou 18,2% de umidade e a seguinte composição química realizada por difratometria de raios X (DRX) realizada em um difratômetro Philips, modelo PW 3710: 24,5%; 20,1% e 0,90% de Ca, S e P_2O_5 , respectivamente.

5.3.4 Primeiro cultivo de soja e avaliações

Inicialmente as sementes foram tratadas com uma solução contendo molibdato de sódio e sulfato de cobalto para fornecer molibdênio (Mo) e cobalto (Co), respectivamente. Após a secagem da solução, as sementes foram tratadas com inoculante turfoso. A semeadura foi realizada no dia 29/11/2017, utilizando-se a cultivar Nidera 5909 RR, no espaçamento entre linhas de 0,5 m e densidade de 300 mil sementes por hectare. Procedeu-se a abertura dos sulcos com o auxílio de uma enxada e a semeadura feita manualmente. Após essa etapa foi implementada a adubação a lanço com P e K com base nos critérios de manutenção para a expectativa de produtividade de quatro toneladas por hectare (CQFS RS/SC, 2016). Dessa forma, foram aplicados 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 75 kg ha⁻¹ de K₂O em todos os tratamentos, utilizando superfosfato triplo e cloreto de potássio como as fontes desses nutrientes.

Os tratamentos fitossanitários realizados antes e durante o ciclo da cultura foram: dessecação de plantas daninhas em pré-semeadura com a aplicação do herbicida glifosato (Sal isopropilamina de N-(phosphonomethyl) glicine 480 g L⁻¹) na dose de 2 L ha⁻¹ e repetição dessa dose no estágio fenológico V3 da cultura (3º trifólio completamente expandido).

A colheita foi realizada mediante amostragem das plantas centrais da parcela, em uma área de 3 m² com posterior pesagem e correção da umidade dos grãos para 13%, possibilitando o cálculo do peso de mil grãos e do rendimento. Os grãos foram secos em estufa a 60°C até o peso constante e depois submetidos à moagem e digestão nítroperclórica de acordo com a metodologia proposta por Sarruge & Haag (1974), possibilitando determinar as concentrações de P, K, Ca, Mg, S e Zn segundo Tedesco et al. (1995).

5.3.5 Primeiro cultivo de inverno: Aveia-preta

Após a colheita do primeiro cultivo de soja foi introduzida a aveia-preta, semeada mecanicamente em junho, no espaçamento de 0,15 m e densidade de 300 plantas por metro quadrado, recebendo a adubação de manutenção para a estimativa do rendimento de três toneladas por hectare (45 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O). Para priorizar a semeadura da soja na época recomendada, optou-se por não colher os grãos de aveia-preta, realizando a dessecação da cultura no dia 16/10/2018 com o herbicida glifosato na dose de 2,0 L ha⁻¹, mantendo a palhada como cobertura de solo.

5.3.6 Segundo cultivo de soja e avaliações

Antes da semeadura as sementes foram tratadas com a mesma solução de Co e Mo do primeiro cultivo, além da aplicação do inoculante turfoso. No dia 06/11/2018 foi semeada mecanicamente a cultura da soja, utilizando-se a cultivar Nidera 5909 RR, sob o mesmo espaçamento entre linhas, densidade de plantas e expectativa de produtividade do primeiro cultivo.

O manejo fitossanitário consistiu na aplicação do herbicida glifosato na dose de $2,0 \text{ L ha}^{-1}$ no estágio fenológico V3. Quando as plantas se apresentavam no estágio fenológico R1 (início do florescimento) foi efetuada uma aplicação preventiva do fungicida Cronnos® (estrobilurina, triazol e alquilenobis) e do inseticida Lannate® (metomil) nas doses de $2,5 \text{ L ha}^{-1}$ e $0,5 \text{ L ha}^{-1}$, respectivamente. Este último para o controle da Lagarta-da-soja (*Anticarsia gemmatalis*).

Quando as plantas estavam no estágio fenológico R2 (final do florescimento) foi mensurada a altura das plantas com uma régua, medindo-se a distância do nível do solo até o ápice da haste principal, utilizando 10 plantas ao acaso por tratamento. Efetuou-se a coleta da parte aérea das plantas para a análise de matéria seca com o auxílio de uma tesoura de poda, sendo que as plantas foram coletadas em 0,5 metros das linhas centrais da parcela e transferidas para uma estufa, mantendo-as na temperatura de 60°C até o peso permanecer constante.

No mesmo período foi realizada a coleta do sistema radicular pelo método descrito por Fujiwara et al. (1994). Utilizou-se um trado de aço de 80 cm de altura e 4,5 cm de diâmetro interno. A amostragem foi feita no ponto central da entre linha ao meio da parcela, coletando as camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm. Os tratamentos selecionados para essa coleta corresponderam às doses corretivas de 0 kg ha^{-1} e 200 kg ha^{-1} de P_2O_5 , com e sem a aplicação de gesso agrícola, sendo feita uma repetição por tratamento.

Depois da colheita a análise dos componentes de rendimento seguiu os mesmos critérios do primeiro cultivo. A concentração dos nutrientes presentes nos grãos foi realizada de acordo com as metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

5.3.7 Amostragem de solo e análises

Após o segundo cultivo de soja, em maio de 2019, foi realizada a coleta de solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm. As amostras foram secas em estufa a 60°C, tamisadas em peneira de malha de 2 mm e posteriormente avaliaram-se os seguintes atributos químicos de acordo com as metodologias propostas por Tedesco et al. (1995): pH-H₂O (relação solo e água de 1:1, pH em solução TSM (Toledo et al., 2012) e acidez potencial (H+Al) estimada por correlação com o valor obtido de pH em solução TSM. P disponível e K trocável, extraídos por Mehlich 1 e determinados por espectrofotometria de absorção molecular (Murphy; Riley, 1962) e fotometria de chama, respectivamente. Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, sendo o Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al por titulação com solução de NaOH a 0,0125 mol L⁻¹. O teor de matéria orgânica foi obtido pelo método de oxidação por solução sulfocrômica e o S extraído por Ca(H₂PO₄)₂·2H₂O e determinado por turbidimetria.

5.3.8 Análise do sistema radicular da soja

As amostras para a avaliação do sistema radicular foram lavadas com jatos de água e auxílio de uma peneira e pinça para a retirada do solo e demais impurezas, como raízes da cultura anterior e material orgânico não decomposto. Após a limpeza, as raízes foram acondicionadas em recipientes plásticos com uma solução aquosa contendo 70% de álcool etílico e armazenadas sob refrigeração a 4°C.

As amostras foram submetidas ao scanner de leitura ótica EPSON LA2400 e a análise realizada pelo programa WinRHIZO, determinando-se o volume, densidade de comprimento e área superficial radicular segundo o método de Tennant (1975). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 60°C para a determinação da matéria seca de raízes.

5.3.9 Segundo cultivo de inverno: Canola

Em 21 de maio de 2019 foi realizada a semeadura de canola na área experimental na densidade de 40 sementes por metro quadrado e sem a aplicação de P e K para a manutenção. No estágio de roseta, com seis folhas desenvolvidas, foram aplicados 30 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia em cobertura. O desenvolvimento da cultura seguiu normalmente até o período de formação das síliquas, porém o cultivo

teve de ser interrompido devido ao ataque de pássaros que consumiram grande parte dos grãos em processo de formação. Procedeu-se então uma roçada das plantas mantendo-as como cobertura de solo.

5.3.10 Eficiência de uso do fósforo

Para o cálculo da eficiência de uso do P (EUP), foi considerada a subtração entre o valor de rendimento obtido para uma dose e o rendimento na menor dose em razão da quantidade total de P_2O_5 aplicada. Ressalta-se que para este cálculo o valor de P_2O_5 correspondeu à quantidade aplicada em correção somando-se ainda o valor residual do experimento anterior e a adubação de manutenção do cultivo analisado. Utilizou-se a equação abaixo, proposta por Syers et al. (2008), para a realização dos cálculos.

$$EUP \text{ (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Rendimento na dose x} - \text{Rendimento na menor dose}}{\text{Quantidade total de } P_2O_5 \text{ aplicada}}$$

5.3.11 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para a verificação da normalidade. Quando não atendida essa pressuposição, foi efetuada a transformação por Box-Cox (BOX & COX, 1964) a fim de serem normalizados. Posteriormente, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) e os efeitos significativos foram desdobrados por regressão se tratando de doses de P_2O_5 ou pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5% para o manejo de gesso. Optou-se por apresentar em tabelas os valores de p correspondentes a cada variável analisada. As análises foram realizadas com auxílio dos programas estatísticos SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011) e Past 3.19, sendo a elaboração dos gráficos feita através do programa SigmaPlot 12.5.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidos efeitos significativos estatisticamente apenas no ano agrícola 2017/18 referindo-se à produtividade, exportação de P, K, Ca, Mg, Zn e teor de K (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo da análise de variância (p-valor) para os componentes de rendimento, exportação e teor de nutrientes nos grãos de soja em função da dose de P₂O₅, manejo do gesso e interação entre os fatores de variação.

Variável analisada	Ano agrícola 2017/18				
	Fatores de variação				
	Dose P ₂ O ₅	Gesso	Interação	CV (%)	Regressão
PMG ⁽¹⁾	0,2294	0,3497	0,5363	15,03	ns
Produtividade	0,0282*	0,0139*	0,1245	10,52	Q
Exp. P	0,0004*	0,0156*	0,2006	10,13	Q
Exp. K	0,0317*	0,1880	0,4877	22,62	ns
Exp. Ca	0,0082*	0,0027*	0,1080	11,58	Q
Exp. Mg	0,0513	0,0033*	0,1141	10,98	ns
Exp. S	0,0633	0,0680	0,1490	15,75	ns
Exp. Zn	0,0801	0,0205*	0,0914	10,16	ns
Teor P	0,1430	0,7948	0,8596	9,23	ns
Teor K	0,0489*	0,9512	0,4554	16,27	Q
Teor Ca	0,0501	0,0999	0,9247	6,29	ns
Teor Mg	0,6182	0,0869	0,5691	4,97	ns
Teor S	0,5917	0,4000	0,6406	13,21	ns
Teor Zn	0,5063	0,7065	0,3482	7,81	ns
Variável analisada	Ano agrícola 2018/19				
	Fatores de variação				
	Dose P ₂ O ₅	Gesso	Interação	CV (%)	Regressão
PMG	0,1392	0,5924	0,3649	14,34	ns
Produtividade	0,2108	0,9956	0,6598	8,37	ns
Altura	0,5132	0,5289	0,1962	5,67	ns
MSPA	0,1440	0,2561	0,5609	15,04	ns
Exp. P	0,1276	0,9735	0,9306	12,98	ns
Exp. K	0,7905	0,7153	0,6799	18,72	ns
Exp. Ca	0,5916	0,8057	0,5715	12,46	ns
Exp. Mg	0,4046	0,1953	0,6745	9,96	ns
Exp. S	0,2126	0,7233	0,9352	14,50	ns
Exp. Zn	0,1661	0,9058	0,9435	17,02	ns
Teor P	0,0599	0,8943	0,4983	9,28	ns
Teor K	0,4054	0,5623	0,4858	15,10	ns
Teor Ca	0,8442	0,7967	0,8520	9,62	ns
Teor Mg	0,0892	0,1112	0,8917	4,83	ns
Teor S	0,3869	0,6674	0,7523	12,15	ns
Teor Zn	0,0561	0,8505	0,9967	11,10	ns

⁽¹⁾ Peso de mil grãos; NS: não significativo estatisticamente; *: significativo (p<0,05); CV: coeficiente de variação; L: linear; Q: quadrática.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

5.4.1 Rendimento, exportação e teor de nutrientes nos grãos de soja do ano agrícola 2017/18

Não houve efeito de interação significativa entre os fatores no rendimento, obtendo-se apenas efeito simples para o fator dose de P e uso de gesso. A produtividade aumentou de maneira quadrática com o a elevação da dose de P, apresentando rendimento máximo na dose de 113,8 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 3 a).

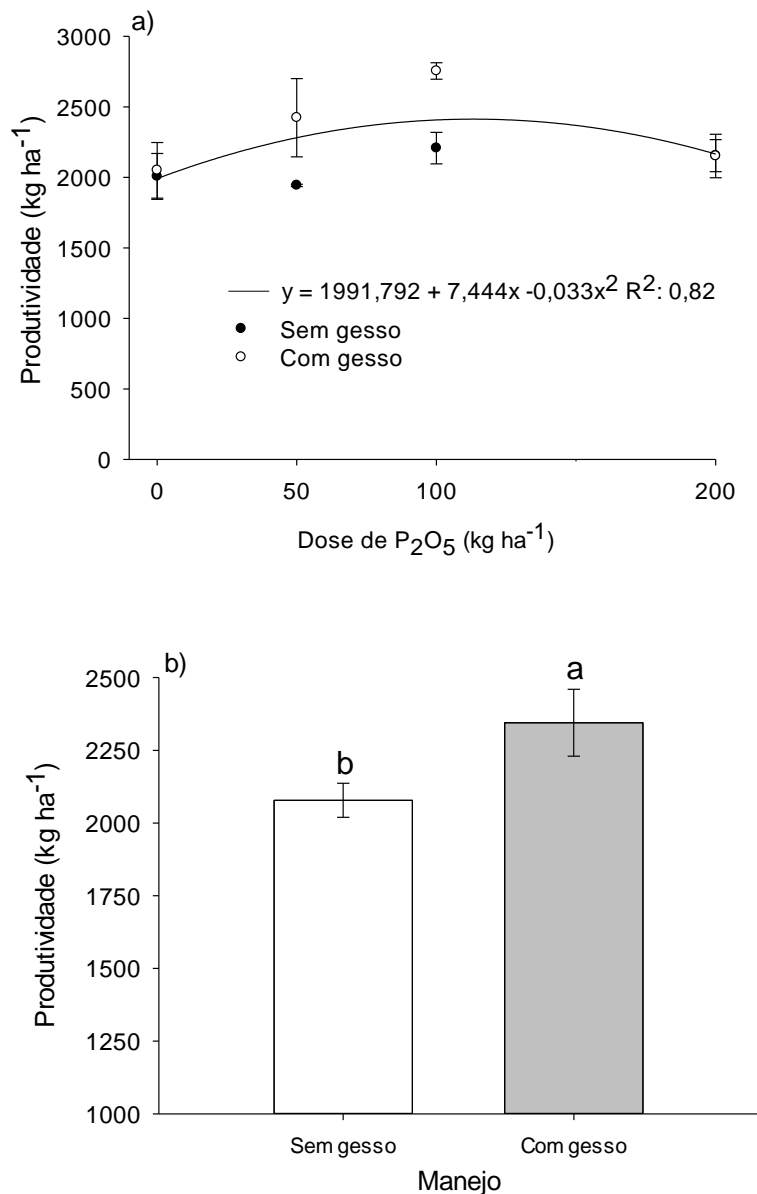
Embora não tenha ocorrido aumento de produtividade após a dose de 100 kg, os teores de P no solo apresentaram-se favoráveis para a cultura (CQFS-RS/SC, 2016). Foi obtido também um efeito geral para gesso (Figura 3 b), com aumento de rendimento com o uso deste insumo, independente da dose de P.

A causa da ausência de incremento em produtividade na última dose de P poderia estar relacionada aos processos de interação iônica entre alguns nutrientes no solo, como o mecanismo de inibição não competitiva entre P e Zn. Sob altas concentrações de P a absorção de Zn pelas plantas é afetada pela formação de fosfato de zinco.

Além disso, teores altos de P no tecido afetam a disponibilidade fisiológica de Zn, sendo este fundamental para a síntese de auxina, responsável pela diferenciação de tecidos vasculares e transporte de assimilados (SILVA & TREVIZAM, 2015; DEON, 2007; PEREIRA et al., 2004). Porém, esta hipótese perde força em função da média dos teores de Zn nos grãos (Tabela 2) estarem de acordo com níveis apresentados na literatura (EMBRAPA, 2011).

Galetto (2018) também constatou comportamento quadrático da produtividade de soja em relação à dose de P, associando o decréscimo do rendimento nas doses mais altas à formação de precipitados com Ca no solo, indisponibilizando P para as plantas.

Figura 3 – Produtividade da soja no ano agrícola 2017/18 em função das doses de P_2O_5 (a) e do manejo de gesso (b).



Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

As doses de P_2O_5 aplicadas não afetaram a concentração de nutrientes nos grãos de soja, com exceção para o K, que reduziu nos grãos com a elevação da fertilização fosfatada (Tabela 2). Esta diminuição do K pode ter influenciado nos processos metabólicos de transporte de assimilados aos grãos como também na síntese de proteínas (VEIGA et al., 2010), provocando baixo rendimento produtivo.

Tabela 2 – Teores de nutrientes nos grãos em função da dose de P₂O₅.

Nutriente (g kg ⁻¹)	Dose de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)				Regressão
	0	50	100	200	
P	2,49	2,62	2,80	2,78	Y = 2,67
K	14,86	19,34	18,84	16,75	Y=15,234+0,080x-36,710 ⁻⁵ x ² R ² :0.86
Ca	2,58	2,87	2,76	2,81	Y = 2,76
Mg	2,47	2,47	2,45	2,54	Y = 2,48
S	1,62	1,60	1,71	1,75	Y = 1,67
Zn	0,041	0,042	0,039	0,041	Y = 0,041

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

De maneira geral, o rendimento médio alcançado foi inferior à média nacional neste mesmo período, a qual foi de 3385 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). Este resultado poderia ser atribuído a questões nutricionais, visto que os teores médios de S e P encontrados nos grãos foram baixos (EMBRAPA, 2011) (Tabela 2); entretanto, os níveis obtidos na análise química do solo demonstraram-se adequados para a cultura da soja (CQFS – RS/SC, 2016). Salieta-se que os valores de P e S no tecido podem ter sido subestimados pelo método de digestão utilizado. Conforme descrito por Ferreira (2014), durante o processo de digestão via úmida envolvendo ácido nítrico, podem ocorrer perdas de S por volatilização. Além disso, os íons PO₄²⁻ e SO₄²⁻ podem se combinar com Ca, formando compostos que afetam a determinação dos nutrientes (PERKIN-ELMER, 1973).

Outras razões para a baixa produtividade seriam os baixos volumes de precipitação que coincidiram com os estágios reprodutivos da cultura e pela incidência de oídio (*Microsphaeria difusa*), que diminuiu o índice de área foliar das plantas e conseqüentemente, afetou o aporte de assimilados para os grãos. Segundo Matsuo et al. (2015), o fungo é favorecido por períodos de clima mais seco, desenvolvendo uma camada branca de micélios sobre as folhas que reduz a eficiência fotossintética da soja.

A produtividade também foi influenciada pelo manejo de gesso. O uso de gesso promoveu acréscimo de 12,8% no rendimento em relação à média dos tratamentos na ausência do insumo (Figura 3 b). Este aumento pode estar associado ao fornecimento de Ca e S pela presença desses nutrientes na composição do gesso agrícola. Observa-se também maior exportação de Ca nos grãos com o uso de gesso (Tabela 3). O Ca na planta desempenha a funções de manter a integridade da parede celular, atuar na germinação dos grãos de pólen e contribuir no desenvolvimento dos

nódulos radiculares, enquanto o S é um nutriente essencial na síntese dos aminoácidos metionina e cisteína que participam na formação estrutural e em outras reações metabólicas das plantas, além de ativar a enzima nitrogenase nos nódulos (CÂMARA, 2015; TAKAHASHI et al., 2011).

Diversos trabalhos demonstraram respostas positivas ao uso de gesso (Zandoná et al., 2015; Pauletti et al., 2014). Embora Tiecher et al., (2018) destacar a maior probabilidade de eficácia do condicionador em situações de estresse hídrico, alguns trabalhos apresentaram boa efetividade sob condições normais de precipitação (DALLA NORA & AMADO, 2013; GALETTO, 2018) como no presente estudo.

Somavilla et al. (2016) ao analisar a produtividade da soja em função da intervenção mecânica e uso de gesso, relacionou o incremento de produtividade da cultura ao fornecimento de S pelo gesso diante do teor próximo ao limite crítico (10 mg dm⁻³), visto que o conteúdo de M.O apresentada era baixa. Por outro lado, Dalla Nora & Amado (2013) obtiveram comportamento linear no aumento de rendimento em relação à saturação de Ca na CTC do solo após a aplicação de gesso, atingindo a máxima produtividade com 35% de saturação na camada de 25-40 cm.

Com exceção do S, a exportação dos nutrientes foi significativa para ao menos um fator (Tabela 3).

Tabela 3 – Exportação de nutrientes em função do manejo de gesso e das doses de P₂O₅ ano agrícola 2017/18.

Nutriente (kg ha ⁻¹)	Manejo de gesso		Dose de P ₂ O ₅
	Sem gesso	Com gesso	Regressão
P	5,57 b	6,23 a	Y=4,88 + 0,029x – 11,7 10 ⁻⁵ x ² R ² : 0,86
K	36,47 a	41,42 a	Y=30,826 + 0,0293x – 0,001x ² R ² : 0,99
Ca	5,59 b	6,61 a	Y=5,205 + 0,028x – 1,2 10 ⁻⁴ x ² R ² : 0,99
Mg	5,06 b	5,92 a	Y=5,492
S	3,89 a	3,43 a	Y=3,667
Zn	0,085 b	0,095 a	Y=0,090

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.
Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Em relação às doses de P, o comportamento para P, K e Ca foi semelhante ao rendimento, devido ao cálculo de exportação ser realizado em função da produtividade da cultura. Observa-se alta exportação de K, por conta de sua atuação na translocação de nutrientes (CÂMARA, 2015). Por outro lado, as exportações de P e Ca também foram favorecidas pelo uso de gesso agrícola, assim como o Mg e Zn.

Estes resultados foram semelhantes aos obtidos por Galetto (2018), cujo verificou aumento quadrático na exportação de P, Ca e S em função de doses de P e gesso. No entanto, o autor observou diminuição da exportação de Mg, atribuindo este efeito à movimentação do íon para as camadas mais profundas do solo devido ao processo de lixiviação promovido pela aplicação de gesso, afetando a absorção do nutriente pelas plantas.

5.4.2 Eficiência de uso de fósforo para a safra 2017/18

A maior eficiência de uso ($1,90 \text{ kg kg}^{-1}$) foi observada para a dose de $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$, corroborando com o resultado apresentado na Figura 3 a. Para as doses de 50 e $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ os valores foram de 1,73 e $0,53 \text{ kg kg}^{-1}$, respectivamente. É notável que no geral houve um baixo aproveitamento do P, evidenciado principalmente pelas baixas produtividades atingidas e reforçado ainda pelos altos teores de P (Mehlich 1) na camada de 0-10 cm, promovidos pelo aporte de fertilizante fosfatado. O balanço positivo de fósforo no solo em SPD foi relatado por Nunes et al. (2011), justificando os altos teores pelo acúmulo de P em função da aplicação de fertilizantes e ausência de incorporação.

5.4.3 Rendimento, exportação e teor de nutrientes nos grãos de soja do ano agrícola 2018/19

De acordo com a Tabela 1, não houve efeito significativo para as variáveis analisadas neste período. A ausência de significância poderia estar relacionada à baixa precipitação (Figura 2) ocorrida principalmente nos estágios iniciais de desenvolvimento da cultura e no final do período enchimento de grãos, afetando as plantas de forma geral. Além disso, a alta disponibilidade dos principais macronutrientes (Tabela 5) na região superficial do solo, podem ter atenuado os efeitos dos fatores dose e gesso. Em relação aos valores médios dos componentes de produção, o PMG e a produtividade foram de $168,5 \text{ g}$ e $3859,9 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente, sendo superior à média obtida na região sul do Brasil (CONAB, 2019). As médias de altura de plantas e MSPA obtidas foram de $0,84 \text{ m}$ e 6725 kg ha^{-1} , esta última, atingido um valor semelhante ao analisado por Oliveira (2011) no mesmo estágio fenológico da cultura.

As quantidades médias de nutrientes exportadas foram de 8,87; 67,25; 8,90; 11,46; 5,15 e 0,15 kg ha⁻¹ para P, K, Ca, Mg, S e Zn, respectivamente. Observam-se baixos valores para P e S, assim como obtido no ano agrícola 2017/18, reflexo dos teores analisados nos grãos.

5.4.4 Atributos químicos do solo

Não houve interação significativa dos fatores para as características químicas analisadas, obtendo-se apenas efeitos independentes. De acordo com a Tabela 4, foi obtido efeito significativo para o fator dose de P₂O₅ nas camadas de 0-10 e 30-40 cm, enquanto para o fator manejo de gesso houve efeito significativo para Ca e Mg na camada de 0-10 cm, S-SO₄⁻² em todas as camadas e pH-H₂O em 30-40 cm (p<0,05). A média dos valores são apresentadas na Tabela 5, independentemente da significância obtida.

Tabela 4 – Resumo da análise de variância (p-valor) para os atributos químicos do solo em função da dose de P₂O₅, manejo do gesso e interação entre os fatores de variação após 15 meses da aplicação de gesso agrícola.

Fatores de variação	Fósforo (mg dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P ₂ O ₅	0,0104*	0,2864	0,5299	0,0008*
Gesso	0,6503	0,1959	0,7842	0,3524
Interação	0,8308	0,1073	0,0858	0,0578
CV (%)	22,25	29,57	16,35	13,71
Regressão	L	ns	ns	Q
Fatores de variação	Potássio (mg dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10**	10-20**	20-30	30-40
Dose P ₂ O ₅	0,5446	0,0617	0,0648	0,0602
Gesso	0,3709	0,2147	0,9530	0,5769
Interação	0,2383	0,5282	0,5737	0,8971
CV (%)	19,07	45,21	20,70	23,37
Regressão	ns	ns	ns	ns
Fatores de variação	Cálcio (cmol _c dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P ₂ O ₅	0,7345	0,4840	0,0976	0,2961
Gesso	0,0044*	0,5912	0,6269	0,0989

(Continua)

Interação	0,6925	0,3425	0,4367	0,0521
CV (%)	9,81	17,52	20,83	24,50
Regressão	ns	ns	ns	ns
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)				
Camada (cm)				
Fatores de variação	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P ₂ O ₅	0,1417	0,9714	0,1139	0,8581
Gesso	0,0008*	0,9743	0,5945	0,4594
Interação	0,4022	0,5211	0,8155	0,2605
CV (%)	7,39	13,59	18,83	19,68
Regressão	ns	ns	ns	ns
Sulfato (mg dm ⁻³)				
Camada (cm)				
Fatores de variação	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P ₂ O ₅	0,1756	0,3010	0,3064	0,2880
Gesso	0,0092*	0,0032*	0,0258*	0,0000*
Interação	0,0511	0,0619	0,1324	0,3610
CV (%)	14,94	15,46	20,30	14,69
Regressão	ns	ns	ns	ns
Alumínio (cmol _c dm ⁻³)				
Camada (cm)				
Fatores de variação	0-10	10-20	20-30**	30-40
Dose P ₂ O ₅	0,9908	0,6869	0,4934	0,2082
Gesso	0,2371	0,1526	0,6935	0,6116
Interação	0,4822	0,4457	0,1940	0,9691
CV (%)	7,77	6,13	6,25	8,85
Regressão	ns	ns	ns	ns
pH-H ₂ O				
Camada (cm)				
Fatores de variação	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P ₂ O ₅	0,8531	0,6291	0,7659	0,3043
Gesso	0,1940	0,9079	0,5499	0,0323*
Interação	0,2619	0,1703	0,9160	0,8916
CV (%)	6,66	8,24	13,48	12,02
Regressão	ns	ns	ns	ns
Matéria orgânica (%)				
Camada (cm)				
Fatores de variação	0-10	10-20	20-30	30-40**
Dose P ₂ O ₅	0,5164	0,1107	0,1355	0,0903
Gesso	0,9432	0,9407	0,1735	0,1510
Interação	0,0679	0,5924	0,2532	0,2122
CV (%)	9,89	12,89	11,90	20,21
Regressão	ns	ns	ns	ns

ns: não significativo estatisticamente; *: significativo (p<0,05); **: dados submetidos à transformação Box-Cox; CV: coeficiente de variação; L: linear; Q: quadrática.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Tabela 5 – Média dos atributos químicos solo por camada analisada.

Camada (cm)	pH*	P*	K	S-SO ₄ ²⁻ *	Ca*	Mg*	Al	M.O
		-----mg dm ⁻³ -----			-----cmol _c dm ⁻³ -----			(%)
0-10	4,72	35,65	376,75	23,66	10,31	5,09	5,49	5,42
10-20	4,63	8,15	178,25	28,71	6,99	4,59	4,92	4,40
20-30	4,55	5,36	98,75	31,85	2,61	2,41	4,39	3,23
30-40	4,38	3,16	92,00	33,10	1,69	1,55	4,18	2,60

*: atributos que apresentaram efeito significativo ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

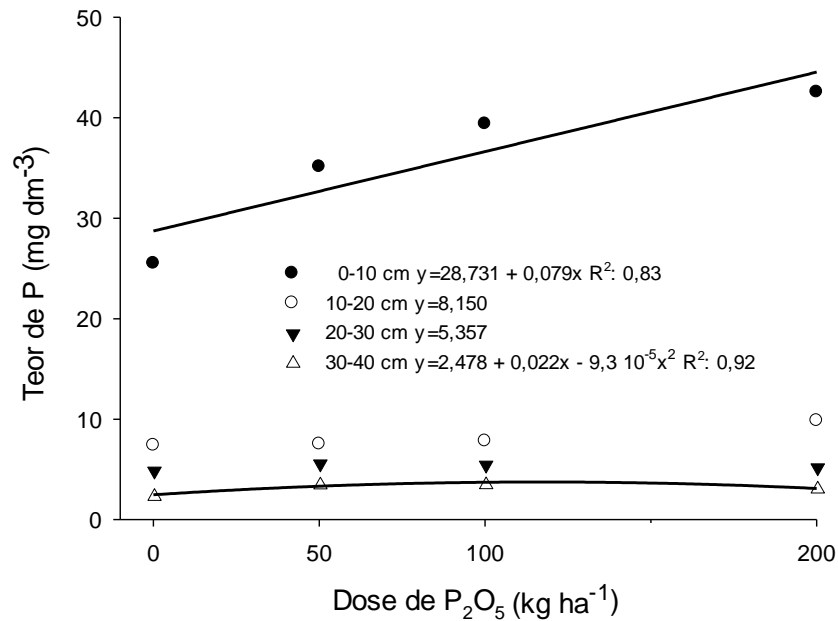
5.4.4.1 Teor de fósforo

Para a camada de 0-10 cm nota-se um ajuste ao modelo de regressão linear, com aumento de 55% do teor entre a testemunha e a maior dose (Figura 4), sendo que os teores estão acima do nível crítico (CQFS RS/SC, 2016) para as culturas de grãos em todas as doses. Atribui-se os altos teores de P nesta camada pelo fornecimento do nutriente em superfície sem incorporação mecânica ao solo. Em contrapartida, a camada de 30-40 cm apresentou comportamento quadrático, com pequeno decréscimo no teor de P para a maior dose, no entanto, esse efeito é irrelevante, visto que não houve aumento significativo nas camadas de 10-20 e 20-30 cm. Dessa forma, o comportamento verificado na camada mais profunda não tem relação com o fornecimento de P em superfície, podendo estar associado à condição preexistente da área experimental.

Maiores teores de P em superfície foram encontrados por Tiecher et al. (2012) ao verificarem maior disponibilidade na camada de 0-5,0 cm após extração por HCl 1M. Os autores atribuíram este comportamento à elevada taxa de saturação dos sítios de adsorção, que diminui a reatividade do fósforo com a superfície dos minerais. Mumbach et al. (2020) constataram acúmulo de P na camada de 0-10 cm de um Cambissolo Húmico após cultivos consecutivos e relacionaram isto ao baixo aproveitamento de P pelas culturas e geração de P residual.

Diante do teor de matéria orgânica obtido neste estudo na camada de 0-10 cm, considerado alto pela CQFS-RS/SC, 2016, enfatiza-se o mecanismo de contribuição dos ácidos orgânicos em competirem pelos mesmos locais de adsorção do P, permitindo assim que o P permaneça sob formas mais lábeis e disponíveis (Redel et al., 2007).

Figura 4 – Teor de fósforo (Mehlich 1) em função da dose de P_2O_5 aplicada.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

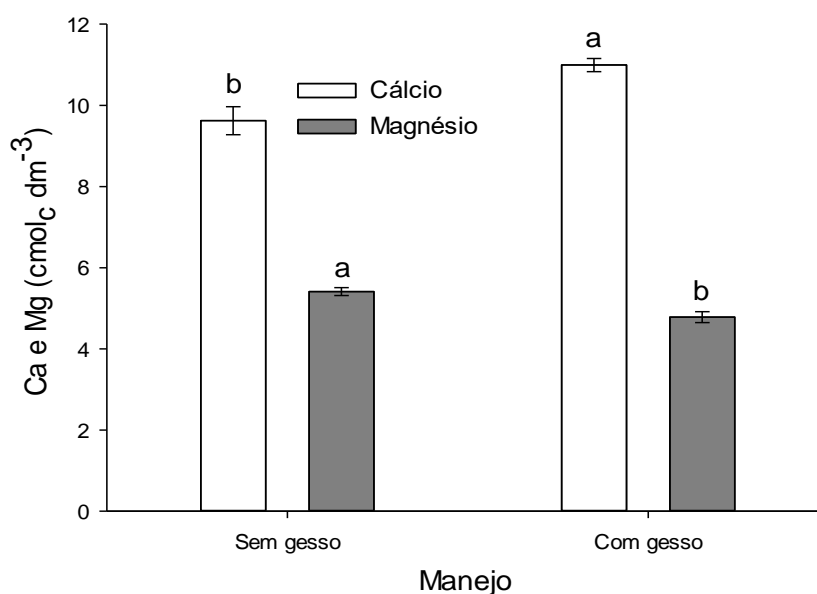
5.4.4.2 Teores de cálcio e magnésio

A aplicação de gesso aumentou em aproximadamente 14% os teores de Ca, enquanto diminuiu o Mg em 13% na camada de 0-10 cm (Figura 5). Segundo Ernani (2016), o Ca proveniente da adição de gesso compete com o Mg pelas cargas elétricas negativas do solo e apresenta preferência pelas mesmas devido ao menor raio hidratado, promovendo o deslocamento do Mg para a solução do solo, deixando-o suscetível as perdas por lixiviação e, conseqüentemente, diminuindo o teor deste no solo.

A remoção de Mg também pode ser explicada pela formação do par iônico com o SO_4^{2-} e sua lixiviação pelo perfil (ZAMBROSI, et al., 2007), devido ao aumento de S- SO_4^{2-} nesta camada (Figura 6). Embora a aplicação de gesso tenha diminuído os teores de Mg na camada mais superficial, não foi constatado efeito nas camadas subsuperficiais em função da possível migração do íon pelo movimento de percolação no perfil. Devido à textura deste solo ser pouco argilosa, o Mg lixiviado pode ter se distribuído até uma região de acúmulo além das camadas estudadas. Zandoná et al. (2015) e Dalla Nora et al. (2013) também observaram diminuição nos teores de Mg na camada de 0-10 cm ao analisarem o solo 8 e 32 meses após a aplicação de gesso, respectivamente.

Em função das alterações químicas ocorridas nesta camada, a relação Ca:Mg, consequentemente sofreu influência, passando de 1,8 para 2,5. O desbalanço entre esses íons influencia a disponibilidades de outros, como o K, gerando desequilíbrios nutricionais que afetam o desenvolvimento das plantas (SALVADOR et al., 2011). O efeito residual do gesso agrícola foi constatado por Fontoura et al. (2019) em um experimento de longa duração sob SPD. Os autores verificaram aumentos expressivos de Ca no solo após um ano da aplicação de gesso, bem como diminuição de Mg até 50 cm de profundidade, sendo que este comportamento novamente observado 11 anos depois.

Figura 5 – Teores de cálcio e magnésio na camada de 0-10 cm em função do manejo de gesso.



Médias no mesmo manejo, seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Fonte: elaborada pelo autor, 2020.

5.4.4.3 Teor de sulfato

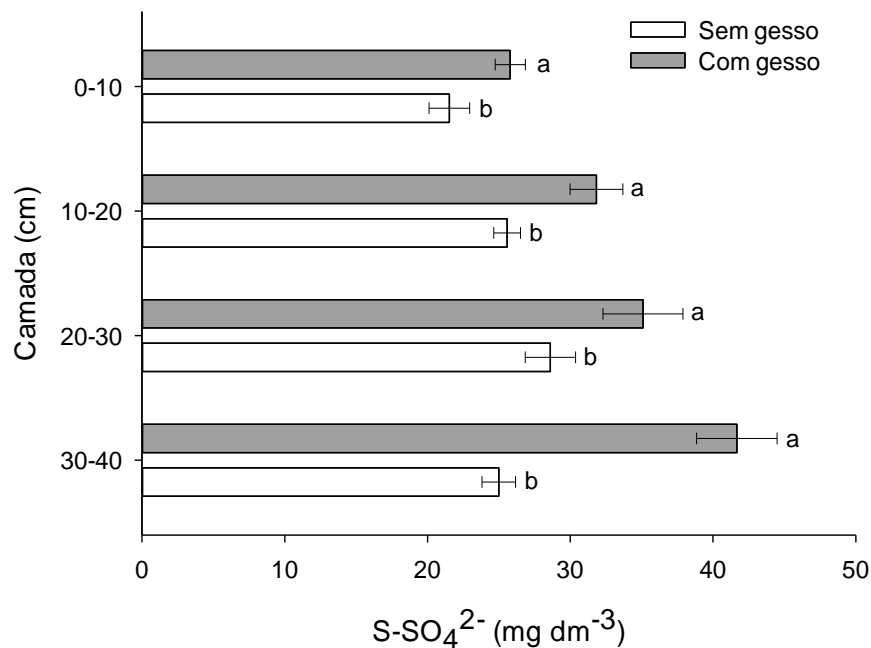
O uso de gesso promoveu aumentos de 20, 25, 23 e 65% nos teores de S-SO₄²⁻ nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm, respectivamente (Figura 6). A maior magnitude deste efeito na camada mais profunda também foi verificada por Crusciol et al. (2016) e Dalla Nora et al. (2017). Apesar dos teores de S-SO₄²⁻ com a aplicação de gesso serem superiores, os valores na ausência de aplicação ainda

estão acima do nível crítico para a maioria das culturas agrícolas (STIPP e CASARIN, 2010) como também encontrado por Dalla Nora et al. (2014), indicando a contribuição da decomposição de resíduos vegetais em disponibilizar este nutriente, visto os altos teores de M.O encontrados neste solo (BISSANI et al., 2008; TIECHER et al., 2012).

Os menores teores de SO_4^{2-} na camada mais superficial, independente do uso ou não de gesso, podem provir da capacidade do íon em formar pare iônico com Al, sendo mobilizado em subsuperfície ou também da maior extração do nutriente nesta camada, dado que a maior concentração de raízes ocorre nesta região.

Os altos teores de S- SO_4^{2-} na camada de 30-40 cm com o uso de gesso podem estar associados à mobilidade do ânion SO_4^{2-} pelo perfil até encontrar regiões do solo mais argilosas e com menor influência de calagem em que este íon sofre maior adsorção e acúmulo (ERNANI, 1986).

Figura 6 – Teores de sulfato no solo em função do manejo de gesso.



Médias seguidas por letras distintas em cada camada diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

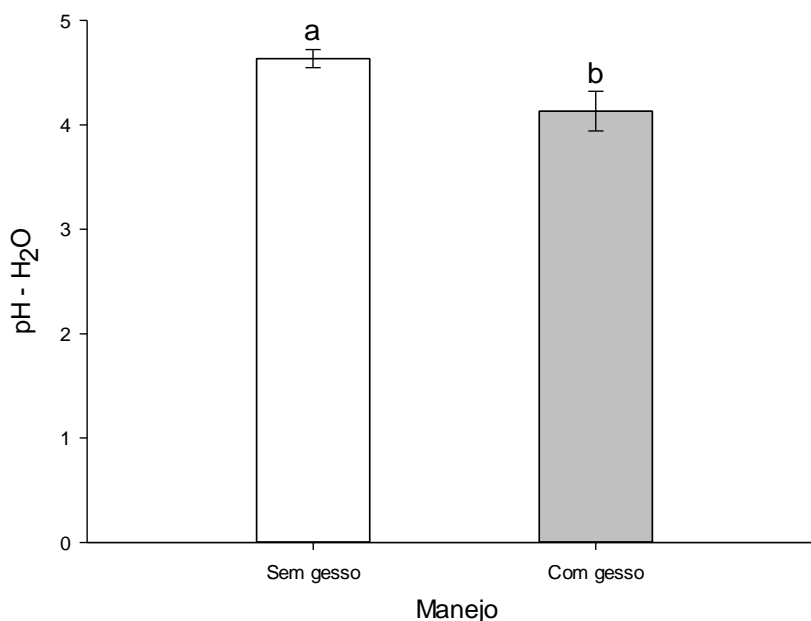
Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

5.4.4.4 pH do solo

O manejo do solo com gesso apresentou 0,5 unidades a menos do que no manejo sem aplicação (Figura 7). Visto que o gesso agrícola não é considerado um

corretivo de acidez, não foi esperada a alteração no pH. Em trabalhos conduzidos em Latossolos por Fontoura et al (2019), Ramos et al. (2013) e Borges et al. (1998), foram obtidos resultados similares aos observados nesta pesquisa, com redução do pH até as camadas mais profundas. Segundo Ernani (2016) e Zoca e Penn (2017), a diminuição do pH provocada pela adição de gesso é atribuída ao deslocamento de H e Al para a solução pelo Ca, permitindo a hidrólise de Al e aumento da acidez. Entretanto, não foi constatado efeito do manejo de gesso sobre o Ca na camada analisada.

Figura 7 – pH-H₂O na camada de 30-40 cm em função do manejo de gesso.



Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Não foram obtidos efeitos significativos para os fatores analisados em relação aos teores de K, Al e M.O. Ao analisar as médias obtidas, verificam-se maiores teores em superfície e decréscimo em profundidade. Em relação aos maiores teores de Al nas camadas superficiais, estes podem ser atribuídos ao alto teor de Ca. Conforme verificado por Ernani et al. (2001), o Ca quando presente no solo em elevados níveis apresenta a capacidade de deslocar o Al das cargas elétricas negativas, aumentando a sua concentração na solução. Além disso, em solos com elevados teores de M.O, parte dos íons hidrogênio (H⁺) constituintes deste coloide podem ser liberados pela

solução extratora de KCl e quantificados simultaneamente com os íons H^+ oriundo das hidrólise do Al, superestimando o teor de Al trocável (CAMPOS et al., 2014).

5.4.5 Análises dos atributos radiculares da soja no ano agrícola 2018/19

Não foram constatados efeitos significativos do manejo de gesso e das doses de P_2O_5 para os parâmetros radiculares da soja (Tabela 6). Observam-se altos coeficientes de variação entre as camadas, com os maiores valores na camada de 30-40 cm, promovidos pela forma de distribuição das raízes em profundidade.

Tabela 6 - Resumo da análise de variância (p-valor) para os atributos radiculares da soja em função da dose de P_2O_5 , manejo do gesso e interação entre os fatores de variação.

Fatores de variação	Volume de raízes ($mm^3\ cm^{-3}$)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P_2O_5	0,4199	0,0811	0,3744	0,9464
Gesso	0,4656	0,7885	0,7999	0,6863
Interação	0,2721	0,7560	0,2538	0,6465
CV (%)	27,73	35,61	36,46	56,72
Fatores de variação	Densidade de raízes ($cm\ cm^{-3}$)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P_2O_5	0,4952	0,0679	0,0997	0,3851
Gesso	0,6338	0,5360	0,3330	0,9925
Interação	0,3581	0,8531	0,1437	0,7834
CV (%)	25,67	28,15	21,98	42,53
Fatores de variação	Área superficial de raízes ($mm^2\ cm^{-3}$)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P_2O_5	0,4482	0,0593	0,0915	0,6650
Gesso	0,5343	0,6632	0,5648	0,8259
Interação	0,3007	0,7957	0,1878	0,7084
CV (%)	26,07	29,81	28,32	48,75
Fatores de variação	Massa seca de raízes ($mg\ cm^{-3}$)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Dose P_2O_5	0,6007	0,1055	0,9017	0,5148
Gesso	0,5710	0,4982	0,2649	0,1067
Interação	0,2867	0,9413	0,9803	0,7421
CV (%)	51,84	44,82	41,79	48,93

Fonte: elaborada pelo autor, 2020.

De maneira geral, a arquitetura radicular não sofreu alteração. Houve maior presença do sistema radicular na superfície do solo em virtude da maior concentração de nutrientes nesta região. A ausência de efeito significativo para o teor de Ca em relação ao manejo de gesso pode ter influenciado nestes resultados, pois era esperado uma maior de concentração de raízes, principalmente em subsuperfície onde foi usado gesso. Em relação ao P, tanto na dose 0 como na de 200 kg ha⁻¹ (Figura 4), os teores no solo apresentam-se acima do nível crítico. Dessa forma, o P disponível na região superficial pode ter sido suficiente para abastecer a demanda nutricional das plantas, não ocorrendo estímulos para modificações na conformação radicular a fim de melhorar a exploração do solo e conseqüentemente, a sua absorção.

Tabela 7 – Médias dos atributos radiculares da soja no ano agrícola 2018/19.

Camada (cm)	VR mm ³ cm ⁻³	DR cm cm ⁻³	ASR mm ² cm ⁻³	MSR mg cm ⁻³
0-10	0,619	0,097	1,096	9,232
10-20	0,330	0,050	0,590	4,926
20-30	0,235	0,027	0,382	3,340
30-40	0,212	0,031	0,350	3,049

VR: Volume de raízes; DR: Densidade de raízes; ASR: Área superficial de raízes; MSR: Massa seca de raízes.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

5.5 CONCLUSÕES

O uso de gesso agrícola não alterou a eficiência da adubação fosfatada. Contudo, no primeiro ano de avaliação o uso deste condicionador de solo promoveu maior produtividade de soja e ocasionou aumento no solo das frações de Ca e S-SO₄²⁻ disponíveis às plantas, enquanto a adição de P incrementou o rendimento da cultura pelo aumento da disponibilidade deste nutriente no solo.

6 CAPÍTULO 2: RESPOSTA DA SOJA E DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES EM FUNÇÃO DO MANEJO DE GESSO AGRÍCOLA E CONDIÇÃO HÍDRICA

6.1 RESUMO

O estresse hídrico é um dos principais fatores limitantes para o desenvolvimento da cultura da soja. O uso de gesso agrícola é uma das formas de atenuar os efeitos negativos causados pela restrição de água no solo em períodos de estiagem. O objetivo do trabalho foi verificar se em condição de restrição hídrica a aplicação de gesso aumenta a produtividade da cultura da soja pelo maior desenvolvimento radicular em subsuperfície. O experimento foi iniciado no ano de 2018 em um Cambissolo Húmico na Fazenda Experimental do CAV/UEDESC, em Lages. Os tratamentos foram compostos por dois manejos de gesso (com e sem aplicação) associados a duas condições hídricas (com e sem restrição hídrica), no esquema fatorial 2x2. As condições hídricas foram promovidas pela cobertura parcial do solo com lonas plásticas e a dose de gesso agrícola utilizada foi de 1400 kg ha⁻¹. Foi introduzida a cultura da soja, sendo que as características avaliadas foram: atributos radiculares, componentes de rendimento e exportação de nutrientes. Os atributos químicos do solo foram analisados nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e de 30 a 40 cm após sete meses da aplicação de gesso. Não houve efeito de interação entre o manejo de gesso e condição hídrica para a soja, contudo, a altura de plantas, a produtividade e consequentemente a exportação de P foram menores com a restrição de água. Os atributos radiculares não foram influenciados pelo manejo de gesso e condição hídrica. No solo a interação ocorreu apenas para o pH, cujo valor foi maior em profundidade com o uso de gesso e sem a limitação de água. A aplicação de gesso aumentou o teor de P e SO₄²⁻ em camadas subsuperficiais, independente da condição hídrica.

Palavras-chaves: Estresse hídrico. Gessagem. Cambissolo Húmico. *Glicine max*.

6.2 INTRODUÇÃO

A produção agrícola na região Sul do Brasil é severamente prejudicada pelos períodos de estiagens causados principalmente pelo fenômeno La Niña, o qual se caracteriza pelo resfriamento das águas do Oceano Pacífico promovendo irregularidades no regime de chuvas nas regiões subtropicais. Dentre as principais culturas agrícolas de sequeiro, a soja é a mais afetada em virtude da alta demanda hídrica da planta durante o seu ciclo (BATISTTI & SENTELHAS, 2017; CUNHA et al., 2011).

O estresse hídrico, causado pela diminuição do potencial de água no solo, é o principal fator abiótico limitante para o desenvolvimento normal da cultura. Quando presente por períodos prolongados, promove alterações nos processos bioquímicos e fisiológicos da planta, como fotossíntese, respiração, absorção e assimilação de nutrientes (JALEEL et al., 2009; CARNEIRO, 2011), impedindo que as plantas expressem o potencial produtivo. A magnitude das perdas causadas pela seca durante o ciclo da cultura depende ainda da intensidade do estresse, estágio fenológico afetado, cultivar e das estratégias de manejo implementadas para atenuar os impactos (ANDRADE & SADRAS, 2000).

Nesse sentido, com a adoção do SPD, observa-se melhor manutenção da umidade do solo em razão da presença de resíduos culturais na superfície do solo, conferindo maior proteção ao processo de evapotranspiração (FERRARI et al., 2015; MOUSSA-MACHRAOUI et al., 2010). No entanto, é necessário assegurar a disponibilidade de água para as plantas através de um conjunto de manejos e não apenas no acúmulo de palhada.

Embora o SPD seja uma alternativa para a utilização agrícola sustentável do solo (SORATTO & CRUSCIOL, 2008), a realização da calagem em superfície e sem incorporação resulta em camadas mais profundas do solo com maior acidez e elevados teores de Al tóxico, além da baixa quantidade de Ca. Conseqüentemente, a exploração do solo pelo sistema radicular em subsuperfície é prejudicado, comprometendo a absorção de água e nutrientes em condições de estresse hídrico prolongado (ZANDONÁ et al., 2015; BORTOLUZZI et al., 2014; DALLA NORA & AMADO, 2013). Portanto, torna-se necessário o condicionamento do solo em profundidade para diminuir os impactos deste gradiente químico (DALLA NORA et al., 2017).

De forma geral, o uso de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é uma alternativa para mitigar principalmente os efeitos do Al tóxico. Por ser um sal de solubilidade superior ao calcário, fornece concomitantemente Ca e SO_4^{2-} (Zoca e Penn, 2017; CQFS-RS/SC, 2016), os quais podem diminuir a toxidez por Al pela redução da atividade do elemento tóxico na solução e pela formação de par iônico, respectivamente (ERNANI, 2016).

Recentes trabalhos de revisão (TIECHER et al., 2018; PIAS et al., 2020) descrevem que as recomendações de gesso para os solos subtropicais deve ser diferentes das regiões tropicais e que as respostas das culturas agrícolas diante da

aplicação deste condicionador é alterada em relação à condição hídrica do solo durante o cultivo e à presença de acidez em profundidade. Levando em consideração esses aspectos, a cultura da soja apresenta maior probabilidade de respostas positivas ao manejo de gesso quando o cultivo coincide com períodos de estresse hídrico em solos de subsuperfície ácida (PAULETTI et al., 2014; ZANDONÁ et al., 2015).

Entretanto, para a extrapolação de recomendações e confirmação dos padrões de respostas apresentados na literatura, é necessária a realização de pesquisas nesse sentido em diversas condições edáficas, objetivando verificar a dinâmica das reações químicas em solos de características distintas. Os Cambissolos apresentam grau de intemperismo e pedogênese mais baixo em relação ao Latossolos (SANTOS et al., 2018), podendo apresentar resultados distintos para a aplicação do gesso agrícola.

6.3 MATERIAL E MÉTODOS

6.3.1 Localização e características do solo

O experimento teve início no ano de 2018 e foi conduzido em condições de campo na fazenda experimental do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC), no município de Lages, SC (27°44'54,11" de latitude Sul e 50° 05' 08,09" de longitude Oeste e 884 metros de altitude). O clima, assim como a classificação e os atributos químicos do solo seguem as características descritas no experimento do capítulo 1.

6.3.2 Histórico da área experimental e implantação dos tratamentos

A área de implantação do experimento foi a mesma do experimento implantado no ano de 2015, o qual apresentava quatro doses de correção de P_2O_5 (0, 50, 100 e 200 kg há⁻¹). A correção da acidez do solo seguiu os mesmos critérios descritos no capítulo 1, bem como a sucessão de cultivos realizados e adubações de manutenção.

O experimento foi instalado em outubro de 2018 sob as parcelas correspondentes a dose de correção de 50 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , no delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e três repetições em

esquema fatorial 2x2. Foram testados dois manejos de gesso, com e sem a aplicação, e duas condições hídricas, com e sem restrição de água no solo. Cada tratamento correspondeu à uma parcela de 4 m² (2 x 2 m).

A dose de gesso (DG) foi calculada de acordo com a fórmula $DG \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = 50 \times \text{teor de argila (\%)} \text{ (SOUSA \& LOBATO, 2004)}$, resultando em 1400 kg ha⁻¹. Após o dimensionamento da dose para o tamanho das parcelas o material foi uniformemente distribuído na superfície do solo de forma manual e homogênea no dia 10/10/2018.

As duas condições hídricas desejáveis foram elaboradas com a instalação de lonas plásticas dispostas de formas diferentes no espaço entre as linhas de semeadura (Apêndice B). Nos tratamentos com o propósito de excluir parcialmente a água proveniente da precipitação pluvial, as lonas plásticas foram colocadas sobre a superfície do solo formado uma calha. Esta instalação objetivou limitar a entrada de água da chuva em 60%. Em torno desses tratamentos também foi instalada uma fita plástica divisória para impedir a entrada de água oriunda de escoamento superficial do ambiente adjacente ao experimento. Para os tratamentos sem restrição hídrica as lonas plásticas foram colocadas em forma de calha inversa, permitindo a entrada de água da precipitação pluvial e mantendo as demais condições ambientais similares.

6.3.3 Cultivo de soja e avaliações

As sementes foram tratadas com uma solução contendo molibdato de sódio e sulfato de cobalto, objetivando fornecer molibdênio (Mo) e cobalto (Co), respectivamente. Após a secagem da solução, as sementes foram tratadas com inoculante turfoso. No dia 06/11/2018 foi semeada mecanicamente a cultura da soja, utilizando-se a cultivar Nidera 5909 RR, sob o espaçamento entre linhas de 0,5 m e densidade de plantas de 300 mil plantas ha⁻¹ com expectativa de produtividade de quatro toneladas por hectare.

O manejo fitossanitário consistiu na aplicação do herbicida glifosato na dose de 2,0 L ha⁻¹ no estágio fenológico V3. Quando as plantas se apresentavam no estágio fenológico R1 foi efetuada uma aplicação preventiva do fungicida Cronnos[®] (estrobilurina, triazol e alquilenobis) e do inseticida Lannate[®] (metomil) nas doses de 2,5 L ha⁻¹ e 0,5 L ha⁻¹, respectivamente. Este último para o controle da Lagarta-da-soja (*Anticarsia gemmatalis*).

Quando as plantas estavam no estágio fenológico R2 foi mensurada a altura das plantas com o auxílio de uma régua, medindo-se a distância do nível do solo até o ápice da haste principal, utilizando 10 plantas ao acaso por tratamento.

No mesmo período foi realizada a coleta do sistema radicular pelo método descrito por Fujiwara et al. (1994). Utilizou-se um trado de aço de 80 cm de altura e 4,5 cm de diâmetro interno. A amostragem foi feita no ponto central da entre linha ao meio da parcela, coletando as camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm, sendo feita uma repetição por tratamento.

A colheita foi realizada mediante amostragem das plantas centrais da parcela em uma área de 1,5 m² com posterior pesagem e correção da umidade dos grãos para 13%, possibilitando o cálculo do peso de mil grãos e rendimento. Os grãos foram secos em estufa a 60°C até o peso constante e depois submetidos à moagem e digestão nítroperclórica de acordo com a metodologia proposta por Sarruge & Haag (1974), possibilitando determinar as concentrações de P, K, Ca, Mg, S e Zn segundo Tedesco et al. (1995).

6.3.4 Amostragem de solo e análises

Em maio de 2019 foi realizada a coleta de solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm. As amostras foram secas em estufa a 60°C, tamisadas em peneira de malha de 2 mm e posteriormente avaliaram-se os seguintes atributos químicos de acordo com as metodologias propostas por Tedesco et al. (1995): pH-H₂O (relação solo e água de 1:1, pH em solução TSM (Toledo et al., 2012) e acidez potencial (H+Al) estimada por correlação com o valor obtido de pH em solução TSM. P e K disponíveis, extraídos por Mehlich 1 e determinados por espectrofotometria de absorção molecular (Murphy; Riley, 1962) e fotometria de chama, respectivamente. Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, sendo o Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al por titulação com solução de NaOH a 0,0125 mol L⁻¹. O teor de matéria orgânica foi obtido pelo método de oxidação por solução sulfocrômica e o S extraído por Ca(H₂PO₄)₂·2H₂O e determinado por turbidimetria. Para o cálculo da saturação da CTC efetiva por alumínio (m) e saturação da CTC pH 7,0 por bases (V) utilizaram-se as equações disponibilizadas pela CQFS – RS/SC, 2016.

6.3.5 Análise do sistema radicular da soja

As amostras para a avaliação do sistema radicular foram lavadas com jatos de água e o auxílio de uma peneira e pinça para a retirada do solo e demais impurezas, como raízes da cultura anterior e material orgânico não decomposto. Após a limpeza, as raízes foram acondicionadas em recipientes plásticos com uma solução aquosa contendo 70% de álcool etílico e armazenadas sob refrigeração a 4°C.

As amostras foram submetidas ao scanner de leitura ótica EPSON LA2400 e a análise realizada pelo programa WinRHIZO, determinando-se o volume, densidade de comprimento e área superficial de raízes segundo o método de Tennant (1975). Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 60°C para a determinação da matéria seca de raízes.

6.3.6 Monitoramento da umidade do solo

Com o intuito de verificar a efetividade do sistema de exclusão de água da chuva nas parcelas experimentais, foram realizadas três coletas de solo nas camadas de 0-10 e 10-20 cm durante o período de duração de cada estágio fenológico da soja. A amostragem foi feita com auxílio de um trato e o solo acondicionado em sacos plásticos para evitar a perda de umidade. A determinação da umidade volumétrica (UV) do solo foi efetuada seguindo as equações fornecidas por Klein (2012) e a densidade do solo pelo método do cilindro volumétrico de acordo com o mesmo autor. O ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de campo (Cc) foram calculados com base nas tensões de 1500 e 10 kPa, respectivamente, com base nas funções de pedotransferência propostas por Costa et al. (2013), as quais levam em consideração a textura e o teor de M.O do solo.

6.3.7 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para a verificação da normalidade. Posteriormente, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Optou-se por apresentar em tabelas os valores de p correspondentes às variáveis de solo com desdobramento daquelas que foram significativas. As análises foram realizadas com

auxílio dos programas estatísticos SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011) e a elaboração dos gráficos feita através do programa SigmaPlot 12.5.

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.4.1 Eficácia do sistema de exclusão de água

Diante dos resultados obtidos para a UV do solo durante o desenvolvimento da cultura, nota-se diferença estatística significativa do teor de umidade entre as condições hídricas implementadas (Tabelas 8 e 9). Os valores foram superiores ao PMP ($0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e menores que a CC ($0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), sendo que na condição de restrição de água durante a emergência e florescimento tenha ocorrido uma proximidade da umidade do solo ao PMP, indicando um possível estresse nestes períodos. Estes valores estimados enquadram-se na faixa encontrada em estudos para o estado de Santa Catarina (Costa et al., 2013; Bortolini & Albuquerque, 2018).

Pelo fato de as determinações de umidade terem sido realizadas a partir de amostragens periódicas, os valores podem não representar os teores reais em função da variabilidade temporal da umidade do solo dentro de cada estágio da cultura, sendo necessária uma determinação constante. Entretanto, ao analisar a diferença entre os rendimentos, pode-se afirmar que o sistema de exclusão de água foi eficaz em seu propósito. Além disso, ao analisar o volume total precipitado (655,2 mm) e considerar a entrada parcial de 40% de água nos tratamentos com restrição hídrica, é obtido um total de 268 mm, sendo este valor inferior à quantidade hídrica necessária para o desenvolvimento normal da soja (EMBRAPA, 2011).

Tabela 8 – Umidade volumétrica do solo do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) durante os estágios fenológicos da soja em função da condição hídrica imposta.

Condição hídrica	Estágio fenológico			
	Emergência	Vegetativo	Florescimento	Enchimento
Sem restrição	0,4632 a	0,3856 a	0,3349 a	0,4193 a
Com restrição	0,2973 b	0,3572 b	0,3053 b	0,3537 b

Médias seguidas de letras diferentes na coluna apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5%. Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Tabela 9 - Umidade volumétrica do solo do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em função da camada de solo analisada.

Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Camada (cm)	
	0 - 10	10 - 20
	0,3515 b	0,3751 a

Médias seguidas de letras diferentes apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

6.4.2 Parâmetros de rendimento e exportação de nutrientes

O manejo de gesso agrícola não influenciou nos parâmetros avaliados e o fator condição hídrica apresentou efeito significativo apenas no rendimento, altura de planta e teor de P exportado nos grãos (Tabela 10).

Tabela 10 - Resumo da análise de variância (p-valor) para rendimento, peso de mil grãos (PMG), altura de planta e exportação de nutrientes nos grãos em função do manejo de gesso, condição hídrica e interação entre os fatores de variação.

Parâmetro	Fatores de variação			
	Gesso	Cond. híd.	Interação	CV (%)
Rendimento	0,6839	0,0174*	0,4104	6,26
PMG	0,4836	0,7462	0,5434	10,02
Altura	0,1978	0,0005*	0,5024	3,21
P	0,6380	0,0049*	0,3897	6,61
K	0,4651	0,2645	0,2970	15,06
Ca	0,3915	0,0656	0,5639	13,42
Mg	0,9632	0,0742	0,9972	7,36
S	0,5191	0,2045	0,8409	16,86

*: significativo ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Diante a ausência de resposta ao manejo de gesso, a produtividade média foi de 3574 kg ha^{-1} , enquanto o PMG e altura de plantas foram de 162 g e 0,77 m, respectivamente. As quantidades médias exportadas de P, K, Ca, Mg e S foram 8,93, 60,50, 7,79, 10,72 e $4,78 \text{ kg ha}^{-1}$.

O rendimento e a altura de planta foram menores na presença de restrição hídrica, assim como o teor de P nos grãos, devido à sua relação com a produtividade (Tabela 11). Na ausência de restrição, o rendimento foi 11,4% superior em relação à condição contrária, sendo que o valor ficou acima da produtividade média do estado de SC (CONAB, 2019), ainda que a cultura tenha sofrido influência do baixo regime hídrico durante o início do cultivo, independentemente da condição promovida neste

experimento. A altura de plantas também foi maior na ausência de restrição hídrica, apesar dos valores baixos, justificados pelo estresse no início do desenvolvimento que prejudicaram este parâmetro morfológico.

Tabela 11 – Rendimento, altura de planta e P exportado em função da condição hídrica imposta.

Parâmetro	Condição hídrica	
	Sem restrição	Com restrição
Rendimento (kg ha ⁻¹)	3766,90 a	3381,05 b
Altura (m)	0,808 a	0,728 b
P (kg ha ⁻¹)	9,585 a	8,275 b

Médias seguidas de letras distintas na linha apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5%.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

A disponibilidade de água no solo está diretamente relacionada com o potencial hídrico das folhas. A redução da umidade do solo interfere no potencial hídrico da planta, desencadeando respostas fisiológicas como o fechamento estomático, resultando em diminuição das trocas gasosas e inibindo processos bioquímicos, entre eles a fotossíntese, respiração celular e absorção de íons (CARNEIRO, 2011).

Assim como nesta pesquisa, Sincik et al. (2008), Gava (2014) e Palharini (2016) verificaram redução da altura de plantas submetidas à déficit hídrico. Esta característica morfológica junto a área foliar são os primeiros atributos morfológicos afetados pelo estresse hídrico (Jaleel et al., 2009). Durante a fase vegetativa da cultura da soja, a limitada disponibilidade de água compromete a diferenciação de nós e o comprimento dos entrenós e conseqüentemente a altura das plantas (DESCLAUX & ROUMET, 1996). Ademais, a redução da disponibilidade de água no solo paralisa o processo de divisão celular (TAIZ & ZEIGER, 2009), o que implica também no crescimento das plantas de soja.

A maior demanda hídrica na cultura da soja ocorre durante o florescimento e enchimento de grãos e a falta de água nesse período é crucial, podendo provocar a queda de flores, abortamento de vagens e principalmente quedas no rendimento da cultura (SILVA et al., 2015). Dalla Nora et al. (2014) observaram redução de 17% na produtividade de soja submetida ao estresse hídrico provocado artificialmente. Por outro lado, Pauletti et al. (2014), analisando o rendimento da cultura da soja com aplicação de gesso, verificaram redução na produtividade da cultura na safra atingida

por estresse hídrico; no entanto, o manejo de gesso atenuou os danos causados pela falta de chuva, resultado este não obtido no presente estudo.

Nesse sentido, diversos autores enfatizam a importância da correção do solo em subsuperfície para a diminuição da saturação por Al e aumento dos teores de Ca, como estratégia de melhorar a qualidade química do solo ao longo do perfil e permitir melhor desenvolvimento radicular em profundidade, suprimindo as exigências nutricionais e hídricas das plantas, com respostas positivas na produtividade (TIECHER et al., 2018; PIAS et al., 2020; DALLA NORA et al., 2017; ZANDONÁ et al., 2015).

A maior produtividade na ausência de restrição hídrica pode ser associada à maior disponibilidade de P em subsuperfície nesta mesma condição. O P é um elemento fundamental nos processos fisiológicos relacionados ao metabolismo de carboidratos, fixação biológica de nitrogênio e transferência de energia nas plantas e o seu suprimento inadequado prejudica o desenvolvimento normal das plantas, bem como diminui a expressão do potencial produtivo (VANCE et al., 2003). Devido ao maior conteúdo de água na camada de 10-20 cm em relação à de 0-10 cm, a disponibilidade de P foi maior, desse modo um abastecimento melhor de P para as plantas podem ter sido promovido em virtude do favorecimento ao fluxo difusivo de P (NOVAIS E SMYTH, 1999).

6.4.3 Análise química do solo sete meses após a aplicação de gesso agrícola

De acordo com a Tabela 12 houve efeito significativo apenas para o teor de P, S-SO₄²⁻ e pH-H₂O. Verifica-se efeito simples para o fator manejo de gesso na camada de 20-30 cm para o P e em todas as camadas, com exceção de 0-10 cm para o S-SO₄²⁻. Em relação à condição hídrica, obteve-se efeito significativo somente para o P na camada de 10-20 cm e a interação entre os fatores ocorreu para o pH-H₂O na camada de 30-40 cm (p<0.05). A média dos atributos são apresentadas na Tabela 13, independentemente da significância obtida.

Tabela 12 - Resumo da análise de variância (p-valor) para os teores de nutrientes e alumínio nas camadas de solo em função do manejo de gesso, condição hídrica e interação entre os fatores de variação.

Fatores de variação	Fósforo (mg dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,3092	0,3728	0,0086*	0,0560
Cond. híd.	0,8587	0,0001*	0,2423	0,3156
Interação	0,2517	0,8584	0,4871	0,5833
CV (%)	30,07	11,71	19,00	27,22
Fatores de variação	Potássio (mg dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,6650	0,8467	0,7683	0,3303
Cond. híd.	0,0786	0,4476	0,8249	0,8594
Interação	0,6255	0,2960	0,9411	0,2363
CV (%)	24,76	33,50	24,44	16,56
Fatores de variação	Cálcio (cmol _c dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,8259	0,0626	0,4177	0,2696
Cond. híd.	0,1973	0,1595	0,2358	0,1626
Interação	0,2455	0,8776	0,7849	0,4094
CV (%)	14,08	22,30	28,15	40,79
Fatores de variação	Magnésio (cmol _c dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,3864	0,3788	0,3284	0,1964
Cond. híd.	0,1194	0,6726	0,4482	0,1033
Interação	0,4342	0,4075	0,4416	0,7243
CV (%)	12,34	20,60	19,05	31,82
Fatores de variação	Sulfato (mg dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,0934	0,0236*	0,0499*	0,0013*
Cond. híd.	0,4907	0,2775	0,6098	0,0764
Interação	0,7596	0,4173	0,6788	0,0983
CV (%)	18,06	31,32	26,30	16,19
Fatores de variação	Alumínio (cmol _c dm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,1772	0,1472	0,4895	0,3926

(Continua)

Cond. híd.	0,4871	0,8702	0,3406	0,6189
Interação	0,2459	0,2975	0,6775	0,7003
CV (%)	83,60	64,49	26,73	14,90
pH-H ₂ O				
Fatores de variação	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,9243	0,8115	0,8369	0,4579
Cond. híd.	0,5226	0,6992	0,9817	0,3582
Interação	0,6371	0,8230	0,2802	0,0286*
CV (%)	5,81	7,41	2,80	2,10
Saturação por alumínio (%)				
Fatores de variação	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,1878	0,0764	0,4106	0,2498
Cond. híd.	0,6017	0,5996	0,3186	0,1807
Interação	0,2161	0,3331	0,6163	0,7651
CV (%)	79,51	64,69	23,48	12,56
Saturação por bases (%)				
Fatores de variação	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,7998	0,0824	0,3841	0,3595
Cond. híd.	0,2002	0,7174	0,4428	0,3182
Interação	0,4133	0,7639	0,8791	0,5120
CV (%)	10,82	19,52	27,20	37,74

*: significativo ($p < 0,05$); CV: coeficiente de variação.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

De forma geral, observa-se maior saturação por bases (V) nas camadas superficiais (0-20 cm), decorrente do maior teor de cátions nessa região do solo (Tabela 13). Apesar dos altos teores de Ca, não houve efeito de redução de Mg pela preferência do cátion de menor raio hidratado nas cargas elétricas negativas (CHARLET & SPOSITO, 1989). Este comportamento pode estar relacionado aos altos níveis de M.O. na superfície, atribuindo ao solo maior CTC e permitindo dessa forma o acúmulo desses nutrientes sem competição direta. Outra possível contribuição da M.O. pode ter ocorrido na diminuição dos teores de Al nas camadas superficiais, visto a menor saturação deste elemento na CTC efetiva (m). Entretanto, nas camadas inferiores os níveis de alumínio forma maiores, promovendo aumento da acidez conforme verificado por Almeida et al. (2019).

Tabela 13 - Média dos atributos químicos solo por camada analisada.

Camada (cm)	P*	K	Ca	Mg	Al
	----- mg dm ⁻³ -----		----- cmol _c dm ⁻³ -----		
0-10	20,66	241,25	10,18	5,54	0,30
10-20	6,55	129,51	7,32	4,88	1,75
20-30	5,23	93,01	2,68	2,48	5,45
30-40	3,35	85,75	1,56	1,56	7,52
Camada (cm)	S-SO ₄ ²⁻ *	m	V	M.O	pH*
	mg dm ⁻³	----- % -----			
0-10	27,10	1,79	69,82	5,30	5,57
10-20	37,05	12,53	47,91	4,40	5,05
20-30	38,07	49,97	16,28	3,10	4,36
30-40	36,70	69,43	8,77	2,42	4,23

*: atributos que apresentaram efeito significativo ($p < 0,05$).

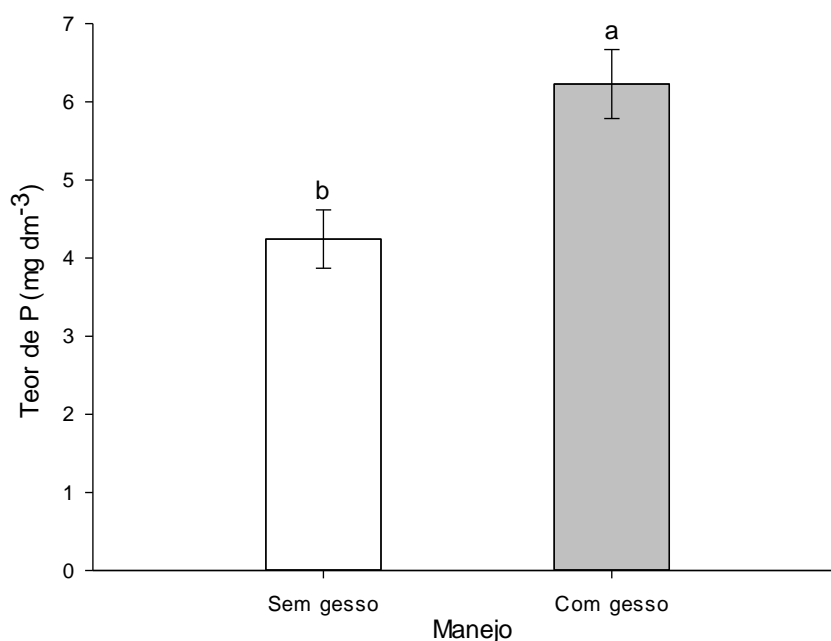
Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

6.4.3.1 Teor de fósforo

A aplicação de gesso demonstrou influência na elevação do teor de P em profundidade (Figura 8). O manejo com gesso aumentou em 47% o nível de P, embora não houve efeitos significativos nas camadas superficiais.

Este aumento pronunciado de P em subsuperfície pode ser explicado fazendo-se uma analogia ao comportamento do calcário verificado por Fontoura et al. (2019), os quais atribuíram a rápida descida de partículas de calcário aos canais formados pela decomposição de raízes no solo, permitindo a reação do corretivo em profundidade. Zambrosi et al. (2007), analisando a especiação iônica da solução, verificou a associação entre P e Ca com a aplicação de gesso na superfície do solo, porém nas regiões mais profundas encontrou formas livres de fosfato, possivelmente geradas pela dissociação de fosfatos de cálcio sob nível de pH mais baixo.

Figura 8 – Teor de fósforo (Mehlich 1) em função do manejo de gesso agrícola na camada de 20-30 cm.



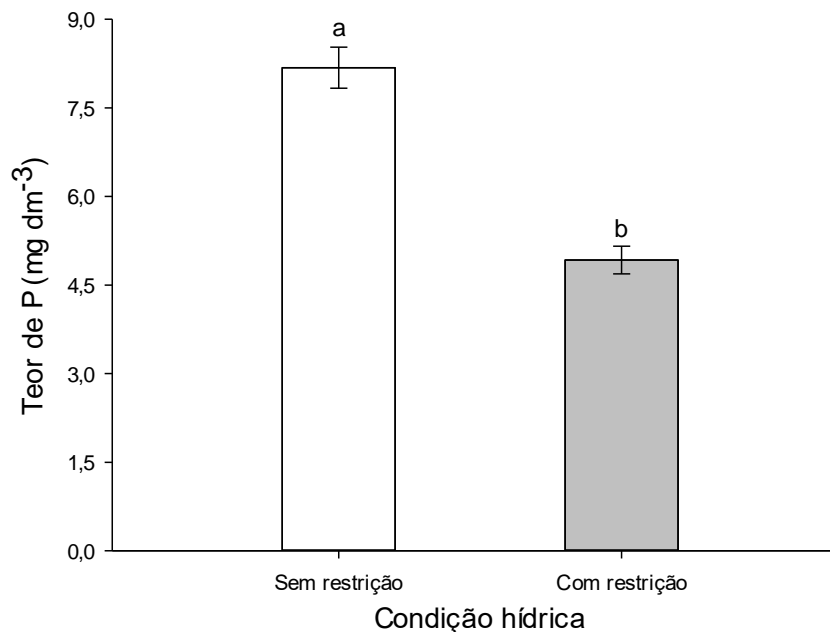
Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Embora a área experimental tenha um histórico de cultivos recente, as culturas podem ter contribuído na formação de bioporos. Estes favoreceram a percolação das partículas do sulfato de cálcio, que se acumularam em uma região mais profunda do solo. Adicionalmente, o gesso agrícola apresenta pequena quantidade de P em sua composição, a qual pode contribuir com o aumento do teor deste elemento.

O aumento do teor de P com a aplicação de gesso agrícola foi relatado por Galetto (2018), verificando aumento linear até 60 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho, em função da constituição química. Gabriel et al. (2018) também encontraram incremento linear de P em um Cambissolo Húmico sob manejo de gesso, entretanto, este acréscimo foi decorrente de doses elevadas do condicionador de solo.

O ambiente de cultivo submetido à limitação de disponibilidade hídrica apresentou menor teor de P (Figura 9).

Figura 9 – Teor de fósforo (Mehlich 1) na camada de 10-20 cm em função da condição hídrica imposta.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Ao analisar as características químicas que podem estar vinculadas ao resultado obtido, o teor expressivo de M.O. é um fator que pode ser atribuído na interpretação e explicação de possíveis processos químicos neste caso. Em virtude da dependência de umidade no solo para a ocorrência das reações de mineralização de P orgânico (Po) promovidas por microrganismos (ERNANI, 2016; OBERSON & JONER, 2005), considera-se que a condição de restrição hídrica possa ter influenciado na transformação de Po em formas lábeis de P inorgânico (Pi), refletindo em menor teor recuperado pelo extrator Mehlich 1.

De maneira simultânea, a liberação de ácidos orgânicos pelo metabolismo microorgânico pode ter sido reduzida, diminuindo a competição destes com os íons ortofosfatos oriundos de P aplicado na forma mineral ou de excreção microbiana na superfície das argilas. Estes compostos orgânicos apresentam a capacidade de bloquear os sítios de adsorção de P (ROSA et al., 2019).

Além disso, a difusão do P em subsuperfície pode ter ocorrido em menor magnitude, resultando no teor mais baixo nesta camada. Supõe-se assim que o fluxo difusivo do fósforo nesta condição hídrica foi dificultado pela menor umidade do solo em comparação ao ambiente sem limitação hídrica, visto que a água é o meio no qual o processo de difusão ocorre (NOVAIS E SMYTH, 1999).

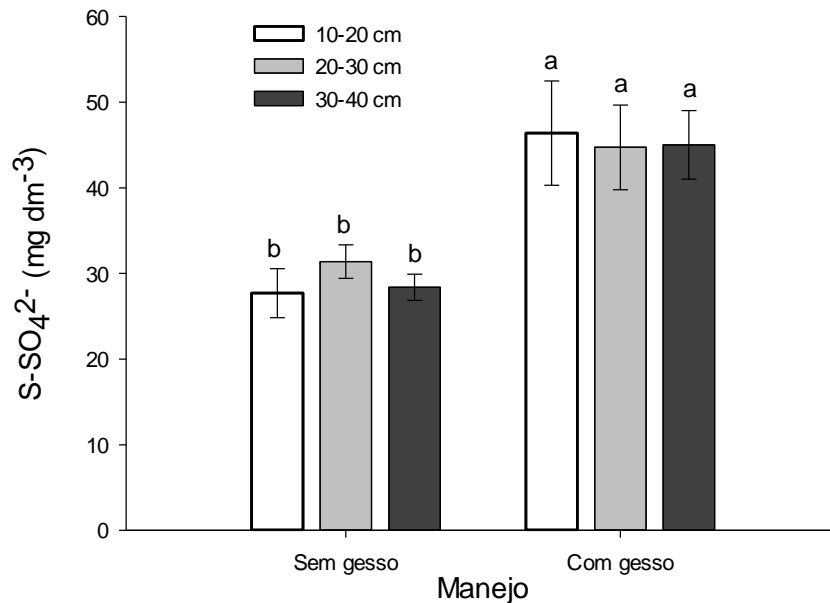
6.4.3.2 Teor de sulfato

De acordo com a Figura 10, a aplicação de gesso agrícola elevou os teores de S-SO₄⁻² no perfil do solo, com exceção da camada de 0-10 cm (27,10 mg dm⁻³). Em ambos os manejos os teores estiveram acima do nível de suficiência para a maioria das culturas agrícolas, incluindo a da soja (CQFS – RS/SC, 2016), visto que na ausência da aplicação de gesso, o SO₄⁻² pode ter sido disponibilizado pela M.O. do solo, a qual é fonte deste nutriente.

Em virtude da alta solubilidade do gesso (Zoca e Penn, 2017), observa-se um incremento homogêneo dos teores entre as camadas, evidenciando a distribuição uniforme do nutriente no solo, provavelmente favorecida pela textura menos argilosa do solo, a qual permitiu melhor percolação de S-SO₄⁻² sem que houvesse uma camada com maior teor acumulado, efeito o qual também verificado por Caires et al. (2003). Embora tenha ocorrido mobilização desde íon pelo perfil, não foi verificado efeito significativo para os cátions. Supõe-se que devido ao potencial elétrico negativo do solo, promovido pela ação da calagem e acentuado pelo teor de M.O. deste solo, os cátions possam ter se adsorvido nas regiões mais superficiais do solo. Em contrapartida o SO₄⁻² foi mobilizado no perfil em função da repulsão do íon pelas cargas negativas do solo, além disso o alto teor de M.O. pode ter contribuído para este efeito, dado que esta fração coloidal demonstra baixo ponto de carga zero (PCZ) (ALLEONI et al., 2019). Salienta-se também o possível efeito de formação do par iônico AlSO₄⁺, dado os altos teores de Al, embora Cunha et al. (2018) tenha observado baixa atividade de SO₄⁻² em um Cambissolo Húmico da mesma região.

A homogeneidade no teor de SO₄⁻² pelo perfil foi semelhante ao encontrado por Rampin & Lana (2015), bem como os teores ao utilizarmos a regressão apresentada pelos autores. Por outro lado, Dalla Nora et al. (2017) encontraram as maiores concentrações de SO₄⁻² em camadas mais profundas onde foram aplicadas doses elevadas.

Figura 10 – Teor de enxofre no solo nas camadas de 10-20, 20-30 e 30-40 cm em função do manejo de gesso agrícola.



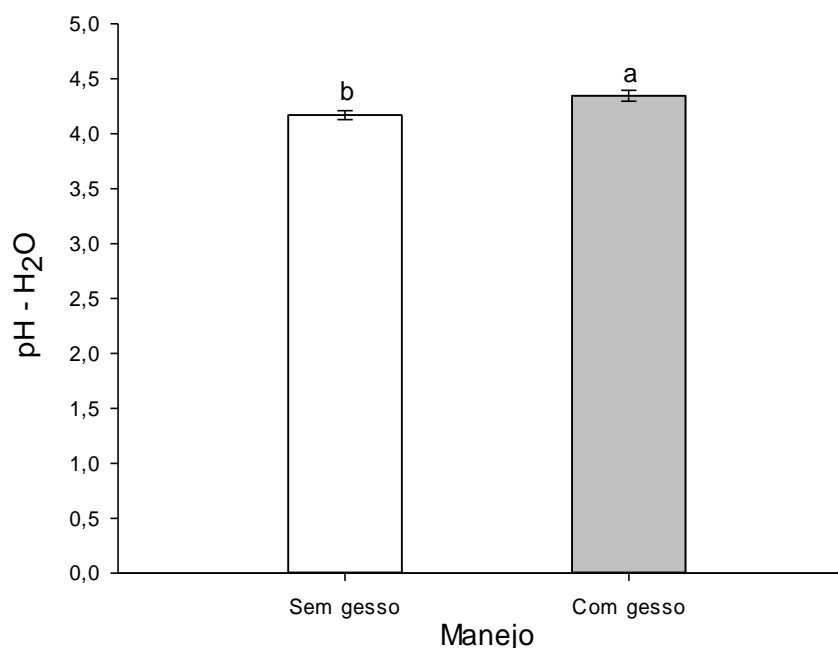
Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

6.4.3.3 pH-H₂O

O nível de pH do solo na camada mais profunda foi maior com a aplicação de gesso agrícola (Figura 11). Esta pequena diminuição da acidez pode ser associada à liberação de SO_4^{2-} na reação de dissociação do gesso e ao seu teor na camada de 30-40 cm (Figura 3) permitindo a formação de complexos de esfera-interna.

Este efeito foi relatado por Dalla Nora et al. (2013) e Pauletti et al. (2014), os quais atribuíram esta alteração química à troca de ligantes na superfície das partículas do solo causada pela adsorção específica de SO_4^{2-} que promove a liberação de hidroxilas na solução do solo, elevando o pH (CAIRES et al., 2003; BISSANI et al., 2008). O sutil aumento de pH pode não ter sido mais pronunciado em função do tamponamento de acidez que sobressai em relação à formação de íons OH^- . Ademais, o íon SO_4^{2-} pode também combinar-se ao Al em solução formando par iônico, reduzindo as reações de hidrólise e liberação de H^+ (ZOCA & PENN, 2017).

Figura 11 – pH-H₂O na camada de 30-40 cm em função do manejo de gesso agrícola sem restrição hídrica.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

6.4.4 Atributos radiculares da soja

Tabela 14 - Resumo da análise de variância (p-valor) para os atributos radiculares da soja da safra 2018/19 em função do manejo de gesso, condição hídrica e interação entre os fatores de variação.

Fatores de variação	Área superficial de raízes (mm ² cm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,3971	0,9156	0,3845	0,8519
Cond. híd.	0,1484	0,6580	0,7622	0,6964
Interação	0,3204	0,4878	0,0566	0,9928
CV (%)	38,25	45,19	33,43	55,86
Fatores de variação	Densidade de raízes (cm cm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,5310	0,7807	0,5610	0,5924
Cond. híd.	0,1695	0,7065	0,9316	0,9683
Interação	0,3185	0,5867	0,8517	0,9683
CV (%)	39,90	46,06	50,51	50,87
Fatores de variação	Volume de raízes (mm ³ cm ⁻³)			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,2813	0,9565	0,8459	0,8807

(Continua)

Cond. híd.	0,1329	0,6179	0,6032	0,5653
Interação	0,3223	0,3983	0,4264	0,9267
CV (%)	36,86	45,66	45,89	64,07
Fatores de variação	Massa seca (mg cm^{-3})			
	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-30	30-40
Gesso	0,0952	0,5716	0,8872	0,8411
Cond. híd.	0,3423	0,9976	0,4204	0,5755
Interação	0,2102	0,2516	0,7988	0,7848
CV (%)	33,00	61,99	49,91	71,03

CV: coeficiente de variação.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

Não houve efeito significativo para os atributos radiculares (Tabela 14). Observam-se altos valores de coeficientes de variação (CV), decorrentes da grande variabilidade do sistema radicular entre as repetições.

De acordo com as médias calculadas (Tabela 15), há uma maior concentração de raízes nas camadas mais superiores, sendo que 68 e 75% do volume e massa seca está presente nos primeiros 20 cm do solo, o que pode contribuir na formação de canais e na estruturação do solo nessa região após o processo de decomposição.

Tabela 15 – Médias dos atributos radiculares em função da camada de solo analisada.

Camada (cm)	VR	DR	ASR	MSR
	$\text{mm}^3 \text{cm}^{-3}$	cm cm^{-3}	$\text{mm}^2 \text{cm}^{-3}$	mg cm^{-3}
0-10	0,484	0,859	7,225	0,089
10-20	0,213	0,391	3,231	0,033
20-30	0,144	0,251	2,416	0,019
30-40	0,180	0,235	2,279	0,021

VR: Volume de raízes; DR: Densidade de raízes; ASR: Área superficial de raízes; MSR: Massa seca de raízes.

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.

6.5 CONCLUSÕES

A restrição hídrica afetou negativamente a produtividade da soja, porém o gesso agrícola na dose utilizada não contribuiu para a mitigação deste problema, tampouco no aproveitamento de P pela cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, J. et al. Influência da aplicação de calcário e gesso na cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill). **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, v. 18, p.1980-1988, 2014.

ALLEONI, L. R. F. et al. **Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo**. In: Melo, V. F.; ALLEONI, L. R. F Química e mineralogia do solo: Conceitos básicos e aplicações. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019, p. 765-826.

ALMEIDA, J. A. **Fatores Abióticos**. In: BOLDRINI, I. I. Biodiversidade dos Campos do Planalto das Araucárias. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente - Série Biodiversidade, v. 1, p. 19-38, 2009.

ALMEIDA, J. A. et al. Atributos químicos, físicos e mineralógicos de solos derivados de rochas sedimentares do Planalto de Lages-SC, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. 1-12, 2019.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ALVAREZ, V. H. et al. **Uso de gesso agrícola**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, p. 67-78, 1999.

ANDRADE, F. H.; SADRAS V. O. **Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja**. EEA INTA Balcarce-Fac. de Ciencias Agrarias UNMP, 2000, 756 p.

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. **Fósforo**. In: FERNANDES, M.S. Nutrição Mineral de Plantas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa: SBCS, p. 253-280, 2006.

ARRUDA, F. B. et al. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível baseado na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 11-15, 1987.

BALEMI, T.; NEGISHO, K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 12, p. 547-561, 2012.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York, John & Wiley, p. 398, 1984.

BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**. v. 397, p. 401-409, 2015.

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

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

BISSANI, C. A. et al. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2º Edição. Departamento de Solos, UFRGS, 2008. 344 p.

BOER, M. A. et al. **Phosphorus: Reserves, Production, and Applications**. In: Ohtake, H.; Tsuneda, S. Phosphorus Recovery and Recynclin. Springer Nature Singapore, p. 75-100, 2019.

BORGES, E. N. et al. Acúmulo de n e p na parte aérea da soja após compactação subsuperficial e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 22, p. 127-133, 1998.

BORGES, E. N. et al. Alterações nos componentes da acidez do solo promovidas em camada subsuperficial compactada pela aplicação superficial de gesso. **Revista Ceres**, v.45, p. 55-64, 1998.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Soybean root growth and crop yield in reponse to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38, p. 262-271, 2014.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**. Series B (Methodological), v. 26, p. 211-252, 1964.

BROCH, D. L. et al. Influência no rendimento de plantas de soja pela aplicação de fósforo, calcário e gesso em um latossolo sob plantio direto. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 10, n. 2, p. 211-220, 2008.

BROCH, D.L. et al. Influência no Rendimento de Plantas de Soja pela Aplicação de Fósforo, Calcário e Gesso em um Latossolo Sob Plantio Direto. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**. v. 10, p. 211-220, 2008. BUCHER, C. A.; BUCHER, C. P. C.; ARAUJO, A. P.; SPERANDIO, M. V. L. **Fósforo**. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. Nutrição Mineral de Plantas. Viçosa: SBCS, p. 401-428, 2018.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.

CÂMARA, G. M. S. **Adubação**. In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. Soja: do plantio à colheita. UFV, Viçosa, 2015, p. 110-148.

CAMPOS, J. R. R. et al. Extração e quantificação de alumínio trocável em Organossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 3, p. 207-214, 2014.

CANER, L. et al. Basalt and rhyo-dacite weathering and soil clay formation under subtropical climate in southern Brazil. **Geoderma**, v. 235–236, p. 100–112, 2014.

CARNEIRO, M. M. L. C. **Trocas gasosas e metabolismo antioxidativo em plantas de girassol em resposta ao déficit hídrico**. 2011. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2011.

CARVALHO, B. V. **Efeito residual do gesso e adubação fosfatada nas culturas da braquiária e da soja**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Jataí, GO, 2017.

CHARLET, L.; SPOSITO, G. Bivalent ion adsorption by an Oxisol. **Soil Science Society of America Journal Soil**. v. 53, p. 691-595, 1989.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO (CQFS)- RS/SC. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul. [s.l.]. 11 ed. 2016, 376 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira – Grãos**. SAFRA 2019/20 – v. 7, n. 6, p. 1-89, 2020.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira – grãos**. v. 5, n. 9, 2018.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira – grãos**. v. 7, n. 9, 2019.

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**. v. 137, p. 87-99, 2016.

CUNHA, G. O. M. et al. Composition, chemical speciation and activity of ions in the solution of Brazilian acid soils. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, p. 1-10, 2018.

CUNHA, G. R. et al. El Niño/La Niña – Oscilação Sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Revista Plantio Direto**. p. 18-22, 2011.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. **Agronomy Journal**, v. 105, p. 1393-1403, 2013.

DALLA NORA, D. et al. Formação de um perfil de enraizamento profundo e a estabilidade da produtividade de culturas de grãos sob Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto**. ed. 139, p. 19-29, 2014.

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**. v. 41, p. 1–22, 2017.

- DELISTOIANOV, J. et al. Aplicação de fontes de fósforo e gesso em uma pastagem consorciada estabelecida em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Boletim da Indústria Animal**, v. 49, n. 2, p. 83-90, 1992.
- DEON, M. D. **Crescimento e nutrição da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2007.
- DESCLAUX, D.; ROUMET, P. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. **Field Crops Research**, v. 46, n. 1-3, p. 61-70, 1996.
- DEUS, A. C. F. et al. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil and Tillage Research**. v. 196, p. 1-11, 2020.
- EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil 2012 e 2013**. Sistemas de Produção, 15. Londrina: Embrapa Soja, 2011, 261 p.
- ERNANI, P. R. Alterações de algumas características químicas na camada arável do solo pela aplicação de gesso agrícola sobre a superfície de campos nativos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 10, p. 241-245, 1986.
- ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages, 2016, 254p.
- ERNANI, P. R. et al. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 4, p. 825-831, 2001.
- FAO. **Fertilizers by Nutrient**. 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>>.
- FERRARI, E. et al. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015.
- FERREIRA, A. K. C. **Avaliação de métodos de análises químicas de nutrientes em tecido vegetal**. 2014. Dissertação (Mestrado em manejo de solo e água) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2014.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p.1039-1042, 2011.
- FINK, J. R. et al. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, p. 369-379, 2016.
- FINK, J. R. et al. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil & Tillage Research**. v. 155, p. 62-68, 2016.

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

FUGIWARA, M. et al. **A técnica de estudo de raízes pelo método do trado**. Boletim Técnico, 153. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1994. 9 p.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA (FEE). **25 anos de economia gaúcha**. Porto Alegre: FEE, v. 3, 2013.

GABRIEL, A. G. et al. Lime and gypsum applications on soil chemical attributes and initial growth of eucalyptus. **Floresta**, v. 48, n. 4, p. 573-582, 2018.

GALETTO, S. L. **Influência no Rendimento de Plantas de Soja pela Aplicação de Fósforo, Calcário e Gesso em um Latossolo Sob Plantio Direto**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2016.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003, Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p. 231, 2003.

GATIBONI, L. C. et al. **Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações**. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B.J.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v.8, p.141-187.

GAVA, R. **Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill.)**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2014.

GÉRARD, F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils - A myth revisited. **Geoderma**, v. 262, p. 213-226, 2016.

GIEHL, R. F.; VON WIRÉN, N. Root nutrient foraging. **Plant physiol.** v. 166, p. 509-517, 2014.

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: **Simpósio sobre fertilizantes na agricultura brasileira**. Documentos,14. Anais. Brasília: EMBRAPA, p. 206-255, 1984.

HAVLIN, J. L. et al. **Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management**. 7^a ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2005. 515 p.

HODGE, A. et al. Plant root growth, architecture and function. **Plant and Soil**. v. 321, n.1-2, p.153-187, 2009.

JALEEL, C. A. et al. Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints. **Acta Physiology Plant**, v. 31, n. 3, p. 427-436, 2009.

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

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 2ª Edição. Editora Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo/RS, 2012, 240 p.

LIMA, E. et al. **Cálcio e magnésio**. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. Nutrição Mineral de Plantas. Viçosa: SBCS, p. 465-490., 2018.

LYNCH, J. P. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany*, Victoria, v. 55, p. 493-512, 2007.

MARCOLAN, A. L. **Suprimento e absorção de fósforo em solos submetidos a diferentes sistemas de preparo**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

MATSUO, E. et al. **Manejo de doenças**. In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. Soja: do plantio à colheita. UFV, Viçosa, 2015, p. 288-309.

MIKKELSEN, R. Os solos e as raízes das plantas. **Informações Agronômicas**. n. 150, 2015.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. de. F. **Química dos solos ácidos**. In: MELO, V. de. F.; ALLEONI, L. R. F. Química e mineralogia do solo: Conceitos básicos e aplicações. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 70-126.

MOTTA, P. E. F. et al. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: Influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 349-359, 2002.

MOUSSA-MACHRAOUI, S. B. et al. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. **Soil Tillage and Research**, v. 106, p. 247-253, 2010.

MUMBACH, G. L. et al. Agronomic efficiency of organomineral fertilizer in sequential grain crops in southern Brazil. **Agronomy Journal**. v. 112, p. 3037-3049, 2020.

MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v. 27, p. 31-36, 1962.

NICHOL, B. E.; OLIVEIRA, L. A. Effects of aluminum on the growth and distribution of calcium in roots of an aluminum-sensitive cultivar of barley (*Hordeum vulgare*). **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 73, n. 12, p. 1849-1858, 1995.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Ed. UFV, Viçosa, MG, 1999, 399 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p. 399, 1999.

NUNES, D. A. D. **Mineralização de fósforo orgânico em solos sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem**. 2011. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campo dos Goytacazes, RJ, 2011.

OBERSON, A.; JONER, E. J. **Microbial turnover of phosphorus in soil**. In: TUNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. Organic phosphorus in the environment. CAB International, 2005, p. 133-164.

OLIVEIRA, J. A. G. **Matéria seca, teores de macronutrientes e produtividade de soja transgênica e não transgênica com diferentes manejos de plantas daninhas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2011.

PALHARINI, W. G. **Influência do estresse hídrico sobre caracteres agronômicos, fisiológicos e abertura de vagens imaturas em soja**. 2016. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

PANTANO, G. et al. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v 30, p. 01-46, 1978.

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.

PENN, C. J; CAMBERATO, J. J. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture**. v. 9, p. 120–138, 2019.

PEREIRA, G. P. W. et al. Os fitohormônios na formação da madeira. **Floresta e Ambiente**. v. 11, n. 2, p. 40-47, 2004.

PEREIRA, T. T. C. et al. Gênese de Latossolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí – Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34, p. 1283-1295, 2010.

PERKIN-ELMER. **Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry**. Norwalk: Perkin-Elmer Corporation, 1973. 476 p.

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

QUEIROZ, R. P. **Adubação fosfatada corretiva e gesso no plantio direto de soja e sorgo sobre pastagem degradada na região do cerrado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, 2005.

- RAMOS, B. Z. et al. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 37, p. 1018-1026, 2013.
- RAMPIM, L.; LANA, M. C. Ion mobility and base saturation after gypsum application in continuous soybean-wheat cropping system under no-till. **Australian Journal of Crop Science**. v. 9, p. 468-476, 2015.
- RESENDE, H. O. **Efeito residual da gessagem e adubação fosfatada na cultura do milho segunda safra**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Jataí, GO, 2018.
- 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.
- RHEINHEIMER, D. S. et al. Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil and Tillage Research**. v. 192, p. 33-41, 2019.
- 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**, v. 313, p. 7-16, 2018.
- ROSA, D. R. et al. Phosphorus availability and soybean growth in contrasting Oxisols in response to humic acid concentrations combined with phosphate sources. **Archives of Agronomy and Soil Science**. v. 8, p. 1-16, 2019.
- ROSOLEM, C. A.; MERLIN, A. Soil phosphorus availability and soybean response to phosphorus starter fertilizer. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1487-1495, 2014.
- ROY, E. D. et al. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature plants**, v. 2, n. 43, p. 1-6, 2016.
- SALVADOR, J. T. et al. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica**. Curitiba, v. 9, n. 1, p. 27-32, 2011.
- SANTOS, H. G. dos. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. Ed, Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SANTOS, P. G. et al. Levantamento pedológico detalhado como suporte para o planejamento do uso de terras. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 14, n. 1, p. 65-74, 2015.
- SARMENTO, P. et al. Resposta da alfafa a fontes de fósforo associadas ao gesso e à calagem. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 381-390, 2001.
- SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. **Análise química das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1974, 56 p.

SCHNEIDER, K. D. et al. Options for Improved Phosphorus Cycling and Use in Agriculture at the Field and Regional Scales. **Journal of Environmental Quality**. v. 48, p. 1247–1264, 2019.

SCHONINGER, E. L. et al. Fertilização com fosfato natural e cinética de absorção de fósforo de soja e plantas de cobertura do cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**. p. 95-106, 2013.

SENTELHAS, P.C. et al. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solution for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 1-18, 2015.

SHEN, J. et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, 2011.

SILVA, F. C. S. et al. **Manejo da irrigação**. In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. Soja: do plantio à colheita. UFV, Viçosa, 2015, p. 214-233.

SILVA, L. C. **Monitoramento do vigor de cafeeiros submetidos a estratégias de manejo para atenuar os efeitos da escassez hídrica**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2019.

SILVA, M. L. S.; TREVIZAM, A. R. Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 149, p. 10-16, 2015.

SINCIK, M. et al. Deficit Irrigation of Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a Sub-humid climate. **Journal of Agronomy and Crop Science**, n. 194, p. 200-205, 2008.

SOARES, G. F. et al. Gypsum and phosphorus in improving biometric and nutritional attributes of soybean/second season corn succession. **Revista Caatinga**. v. 31, n. 2, p. 326 – 335, 2018.

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

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

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado, correção do solo e adubação**, 2 ed. EMBRAPA, Brasília, DF, 2004. 416 p.

SOUSA, D. M. G. et al. **Acidez do solo e sua correção**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, p. 205-274, 2007.

SOUSA, S. M. et al. **Importância da morfologia radicular na eficiência da aquisição de fósforo**. Documentos 105, Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, 2010.

SOUZA, L. C. F. et al. The effects of crop rotation systems on maize agronomic traits under no-tillage in optimal and dry cropping seasons. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 2369-2377, 2016.

SYERS, J. K. et al. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information**. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. FAO, United Nations, Rome, 2008.

SYERS, J. K. et al. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, n.18. Rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. p.108, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009, 819 p.

TAKAHASHI, H. et al. Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes. **Annual Review of Plant Biology**. v. 62, p. 157–184, 2011.

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

TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, p. 995-1001, 1975.

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**, v. 42, p. 1-17, 2018.

TIECHER, T. et al. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p. 271-281, 2012.

TOLEDO, J. A. et al. Tampão Santa Maria (TSM) como alternativa ao tampão SMP para medição da acidez potencial de solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 427-435, 2012.

VANCE, C. P. et al. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v. 157, p. 423-447, 2003.

VEIGA, A. D. et al. Influência do potássio e da calagem na composição química, qualidade fisiológica e na atividade enzimática de semente de soja. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 34, n. 4, p. 953-960, 2010.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v.15, p. 1-19, 1976.

WITHERS, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, London, v. 8, p. 1-13, 2018.

ZAMBROSI, F. C. B. et al. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 110-117, 2007.

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

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

APÊNDICES

Apêndice A – Histórico de adubações da área experimental e quantidade de P e K presentes antes da implantação do experimento.

Ano agrícola	Prática ou cultivo	----- Quantidade de P ₂ O ₅ /K ₂ O (kg ha ⁻¹) -----			
2015	Correção de P e K	0/0	50/0	100/0	200/0
2015	Trigo	45/30	45/30	45/30	45/30
2015/16	Feijão	90/60	90/60	90/60	90/60
2016	Trigo	45/30	45/30	45/30	45/30
2016/17	Milho	30/40	30/40	30/40	30/40
Aporte total de P ₂ O ₅ /K ₂ O (kg ha ⁻¹)		210/160	260/160	310/160	410/160
Extração total (kg ha ⁻¹)*		152,5/121,8	152,5/121,8	152,5/121,8	152,5/121,8
Saldo (kg ha ⁻¹)		57,5/38,2	107,5/38,2	157,5/38,2	257,5/38,2

Fonte: Elaborada pelo autor, 2020. *: extração baseada nas quantidades apresentadas pela CQFS-RS/SC (2016).

Apêndice B – Adaptação da análise de enxofre (S-SO₄²⁻) do solo descrita por Tedesco et al. (1995)

Materiais

Almofariz e pistilo;

Chapa aquecedora;

Béqueres de 50 ml;

Vidro de relógio;

Espectrofotômetro de absorção molecular.

Soluções

Solução extratora (500 mg L⁻¹ de P): Adicionar previamente 50 ml de HCl em 700 ml de água destilada. Pesar 2,02 g de Ca(H₂PO₄)₂·H₂O e dissolver até completar o volume de 1 L com água destilada. Durante este processo é importante controlar o pH

da solução, ajustando-o para 3,0. Opcionalmente, pode-se macerar o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ em almofariz para facilitar a dissolução;

$\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 3:1: idem Tedesco et al. (1995);

BaCl_2 -gelatina: idem Tedesco et al. (1995);

Padrão de 500 mg L^{-1} de S: idem Tedesco et al. (1995);

Padrão de 50 mg L^{-1} de S: idem Tedesco et al. (1995).

Procedimento

- a) Medir 10 ml de solo seco, adicionar em frasco de vidro “snap cap” de 90 ml com tampa;
- b) Adicionar 50 ml da solução extratora, agitar por 30 minutos e decantar por 16-18 horas;
- c) Pipetar 20 ml do sobrenadante para béqueres de 50 ml;
- d) Evaporar a $120\text{-}130^\circ\text{C}$ até secar. Após a evaporação da água, retirar imediatamente o béquer. Cuidar para não “queimar a amostra” (coloração preta). O tempo de secagem pode levar até 3 horas. O aspecto da amostra deve ficar semelhante ao da Figura A;

Figura A – Aspecto visual da amostra após a secagem.



- e) Deixar esfriar e adicionar 1 ml de $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 3:1;
- f) Aquecer a $150\text{-}160^\circ\text{C}$ por 10 minutos com o béquer tampado com o vidro de relógio (Figura B) e não retirar até que não haja mais fumaça marrom (NO_2);

Figura B – Digestão nitroperclórica das amostras.



g) Manter por mais 10 minutos a 150-160°C sem o vidro de relógio. O conteúdo deve ficar com coloração clara e um pouco úmido (Figura C);

Figura C – Aspecto visual da amostra após a digestão nitroperclórica.



h) Retirar o béquer da chapa aquecedora e ainda quente adicionar 10 ml de água destilada;

i) Adicionar 1 ml da solução BaCl₂-gelatina e agitar. Ocorrerá a formação de precipitado gerando turbidez na amostra (Figura D);

Figura D – Formação de turbidez após a adição de BaCl₂-gelatina.



j) Após 30 minutos, agitar novamente e determinar a absorvância em 440 nm;

Preparação da curva padrão

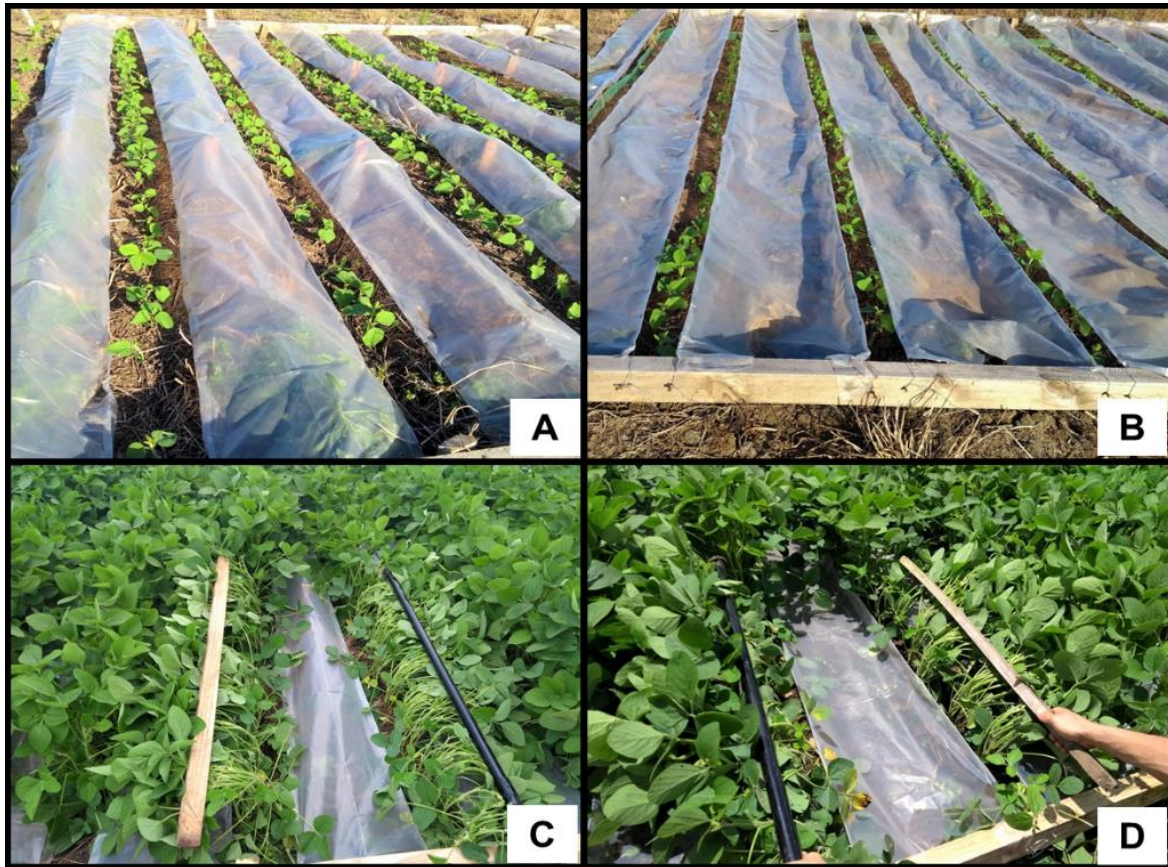
Pipetar 20 ml da solução extratora para os béqueres;

Adicionar 0,0 – 0,5 – 1,0 – 2,0 – 3,0 e 4,0 ml da solução padrão de 50 mg L⁻¹ de S;

Conduzir conjuntamente com as amostras a partir do item d.

Cálculos: idem Tedesco et al. (1995).

Apêndice C – Sistema de controle de entrada de água pluvial; sem restrição hídrica (A) e (C), com restrição hídrica (B) e (D).



Fonte: Elaborada pelo autor, 2020.