

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CARLOS EDUARDO SERBER

ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO E PERFORMANCE DA SOJA CONSIDERANDO
A ROTAÇÃO DE CULTURAS E O USO DE GESSO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

PONTA GROSSA
2023

CARLOS EDUARDO SERBER

ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO E PERFORMANCE DA SOJA CONSIDERANDO
A ROTAÇÃO DE CULTURAS E O USO DE GESSO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de Ciência do Solo e Recursos Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires
Coorientadora: Dra. Lutécia Beatriz dos Santos Canalli

PONTA GROSSA
2023

S482 Serber, Carlos Eduardo
Alterações químicas do solo e performance da soja considerando a rotação de culturas e o uso de gesso em sistema plantio direto / Carlos Eduardo Serber. Ponta Grossa, 2023.

78 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração: Ciência do Solo e Recursos Ambientais), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires.

Coorientadora: Profa. Dra. Lúcia Beatriz dos Santos Canalli.

1. Agricultura de conservação. 2. Acidez do subsolo. 3. Nutrição. 4. Glycine max (L.) merrill. I. Caires, Eduardo Fávero. II. Canalli, Lúcia Beatriz dos Santos. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ciência do Solo e Recursos Ambientais. IV.T.

CDD: 631



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “Alterações químicas do solo e performance da soja considerando a rotação de culturas e o uso de gesso em sistema plantio direto”.

Nome: **Carlos Eduardo Serber**

Orientador: **Eduardo Fávero Caires**

Aprovado pela Comissão Examinadora:
Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires
Dr^a Josiane Burkner dos Santos
Dr. Hélio Antonio Wood Joris

Ponta Grossa, 27 de novembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Favero Caires, Professor(a)**, em 27/11/2023, às 12:24, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Helio Antonio Wood Joris, Usuário Externo**, em 27/11/2023, às 19:40, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Josiane Burkner dos Santos, Usuário Externo**, em 30/11/2023, às 07:30, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **1723400** e o código CRC **59BD4E48**.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Davi Serber e Juraci Serber, e ao meu irmão Lucas Felipe Serber pelos conselhos, amor e lealdade.

A minha madrinha Márcia Carneiro pelo seu carinho e orações.

Aos meus orientadores, Eduardo Fávero Caires e Lutécia Beatriz dos Santos Canalli pelas oportunidades de crescimento e a chance de mudar meu destino.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, toda honra e glória.

À minha família e a minha madrinha, por acreditarem nos meus sonhos e pelo amor incondicional.

Aos meus orientadores Eduardo Fávero Caires e Lutécia Beatriz dos Santos Canalli por toda dedicação, pelas orientações, pelo exímio profissionalismo e por suas valiosas amizades. Vocês foram essenciais e me proporcionaram a chance de realizar um sonho.

Àqueles que já partiram dessa vida, guardarei seus legados em meu coração.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-PR), por todo suporte e as suas estruturas proporcionadas para a realização desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação Araucária/SETI/SENAR pelo auxílio à pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade de crescimento e aperfeiçoamento profissional.

À todas as pessoas que, mesmo não mencionadas, contribuíram para a realização deste trabalho.

Pôs-me as mãos sobre os ombros e dourou-me
A frente com o olhar;
E esta febre de Além, que me consome,
E este querer grandeza são seu nome
Dentro de mim a vibrar.

E eu vou, e a luz do gládio erguido dá
Em minha face calma.
Cheio de Deus, não temo o que virá,
Pois, venha o que vier, nunca será
Maior do que a minha alma.

Fernando Pessoa

RESUMO

SERBER, C. E. **Alterações químicas do solo e performance da soja considerando a rotação de culturas e o uso de gesso em sistema plantio direto.** Orientador: Eduardo Fávero Caires. Ponta Grossa, 2023. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo e Recursos Ambientais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa – PR, 2023.

Em solos ácidos e de baixa fertilidade, a rotação de culturas e a melhoria do perfil de enraizamento são fundamentais para aumentar o potencial produtivo das culturas e a sustentabilidade dos sistemas de cultivo. O presente estudo avaliou a qualidade química do solo e o desempenho da soja considerando o uso da sucessão de culturas, de diferentes rotações de culturas e da aplicação de gesso agrícola em sistema plantio direto. Foi utilizado o delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas. Nas parcelas, foram utilizadas os seguintes tratamentos: Sucessão - Trigo (T)/Soja (S), rotação I – Aveia Preta (AP)/Milho (M), T/S, T/S, AP/M, T/S, rotação II – Canola (CAN)/M, T/S, Cevada (CEV)/S, CAN/M, T/S, e rotação III - AP + Azevém (Az)/M, AP + Az/S, AP + Az/S, Ervilhaca (Ev)/M, T/S. Nas subparcelas, foram utilizados dois tratamentos, com e sem aplicação de gesso, antes do último cultivo de soja. A aplicação de gesso agrícola aumentou os teores de P e S-SO₄, reduziu o efeito tóxico do Al³⁺ no solo e melhorou a nutrição de P, Ca, S e Zn da soja. A maior diversificação de espécies na rotação III proporcionou aumento nos teores de Ca²⁺, K⁺, S-SO₄ e carbono orgânico no solo. Aumentos na produtividade de grãos da soja ocorreram com a adoção da sucessão de culturas em relação à rotação II, revelando um potencial produtivo da soja semelhante à rotação III. Os resultados sugerem que a maior diversificação do sistema de produção e a aplicação de gesso agrícola promovem melhorias na qualidade do solo e no desempenho da soja.

Palavras-chave: Agricultura de conservação. Acidez do subsolo. Nutrição. *Glycine max* (L.) Merrill.

ABSTRACT

SERBER, C. E. **Changes in soil chemical properties and soybean performance as affected by crop rotations and use of phosphogypsum under a no-till system.** Advisor: Eduardo Fávero Caires. Ponta Grossa, 2023. Dissertation (Master in Soil Science and Environmental Resources) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa – PR, 2023.

In acid soils with low fertility, crop rotation and improvement of the rooting profile are fundamental to increase the crop yield potential and the sustainability of cropping systems. We evaluated the chemical quality of the soil and the performance of soybean considering the use of crop succession, different crop rotations and application of phosphogypsum under a no-till system. A randomized complete block design was used, with four replications in a split-plot arrangement. In the plots, the following treatments were used: Wheat (W)/Soybean (S) succession, rotation I - Black Oat (BO)/Maize (M), W/S, W/S, BO/M, W/S, rotation II – Canola (CAN)/M, W/S, Barley (BAR)/S, CAN/M, W/S, and rotation III: BO + Ryegrass (RY)/M, BO + RY/S, BO + RY/S, Vetch (VET)/M, W/S. In the subplots, two treatments were used, with and without application of phosphogypsum, before the last soybean crop. Phosphogypsum application increased P and SO₄-S contents as well as reduced the toxic effect of Al³⁺ in the soil, and improved the P, Ca, S, and Zn nutrition of soybean. The greater diversification of species in the rotation III provided an increase in Ca²⁺, K⁺, SO₄-S and organic carbon contents in the soil. Increases in soybean grain yield occurred with the adoption of crop succession when compared to rotation II, revealing a soybean yield potential similar to rotation III. The results suggest that greater diversification of the production system and the application of phosphogypsum promote improvements in soil quality and soybean performance.

Keywords: Conservation agriculture. Subsoil acidity. Nutrition. Glycine max (L.) Merrill.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caracterização climática e balanço hídrico na safra de 2021-2022.....	41
Figura 2 - Localização do experimento e croqui da área experimental em Ponta Grossa – PR.	42
Figura 3 - Coleta e preparo de amostras de solo para análise dos atributos químicos.	45
Figura 4 - Coleta e preparo de amostras de plantas para análise da biomassa seca da parte aérea da soja.	45
Figura 5 - Coleta e preparo das amostras de folhas de soja para determinação das concentrações de nutrientes.....	46
Figura 6 - Coleta e preparo de amostras de grãos para estimativa de produtividade de soja. .	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tratamentos com sucessão e rotação de culturas no período de 2017/18 a 2021/22.	42
Tabela 2 - Caracterização química do solo, em diferentes profundidades, após o cultivo da soja em 2019–2020, considerando os tratamentos com sucessão e rotações de culturas empregadas na área experimental.	43
Tabela 3 - Adubação empregada nas culturas considerando os tratamentos com sucessão e rotações sob sistema plantio direto.	44
Tabela 4 - Resumo da análise de variância para os atributos químicos do solo em diferentes profundidades.	48
Tabela 5 - Alterações nos teores de C, P (Mellich-1) e Al^{3+} trocável do solo, em diferentes profundidades, considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.	50
Tabela 6 - Alterações nos teores de Ca^{2+} e S- SO_4 e saturação por alumínio do solo, em diferentes profundidades, considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.	53
Tabela 7 - Alterações nos teores de Mg^{2+} e K^+ e nos níveis de pH do solo, em diferentes profundidades, considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.	55
Tabela 8 - Resumo da análise de variância para teores os teores de nutrientes nas folhas de soja.	57
Tabela 9 - Teores de nutrientes nas folhas de soja cultivada em 2021–2022 considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.	58
Tabela 10 - Resumo da análise de variância para as produtividades de biomassa da parte aérea e de grãos de soja.	60
Tabela 11 - Produtividade de biomassa seca da parte aérea e de grãos de soja, cultivada em 2021–2022, considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	HIPÓTESE	14
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1	TÓPICOS SOBRE INTERAÇÕES NUTRICIONAIS NO SOLO E INFLUÊNCIA EM PLANTAS CULTIVADAS	15
4.2	SISTEMA PLANTIO DIRETO	21
4.3	ROTAÇÃO DE CULTURAS	24
4.4	USO DE GESSO AGRÍCOLA	34
5	MATERIAL E MÉTODOS	41
5.1	HISTÓRICO DA ÁREA, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	41
5.2	AMOSTRAGEM E ANÁLISES QUÍMICAS DE SOLO	44
5.3	PRODUÇÃO DE BIOMASSA DA PARTE AÉREA DA SOJA	45
5.4	CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES NO TECIDO FOLIAR DA SOJA	46
5.5	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA	46
5.6	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	47
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1	ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO	48
6.2	NUTRIÇÃO DA SOJA	56
6.3	PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA DA PARTE AÉREA E DE GRÃOS DE SOJA	59
7	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto tem se destacado como uma das estratégias mais eficazes para aumentar a sustentabilidade da agricultura em regiões tropicais e subtropicais, por minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão. A implementação do sistema plantio direto procede da aplicação de um conjunto de técnicas que preconizam a ausência de revolvimento do solo, a manutenção permanente da cobertura do solo com resíduos vegetais e a adoção da rotação de culturas (Moraes *et al.*, 2017). Apesar dos benefícios causados pela ausência de revolvimento na estruturação do solo, em sistema plantio direto de longo prazo normalmente ocorre estratificação nos atributos químicos do solo a partir da superfície em direção ao subsolo. Tal estratificação resulta em aumento da acidez em camadas subsuperficiais e em forte gradiente de disponibilidade de nutrientes, com as maiores concentrações sendo encontradas nas camadas mais superficiais e acentuada redução nas camadas mais profundas do solo (Tiecher *et al.*, 2017; Calegari *et al.*, 2013).

A rotação de culturas, incluindo o uso de plantas de cobertura, revela-se como uma estratégia importante para a proteção efetiva do solo no sistema plantio direto, ao mesmo tempo em que diversifica o sistema de produção, proporcionando maior equilíbrio na dinâmica de decomposição da fitomassa, otimização do uso de fertilizantes e maior armazenamento de água no solo (Canalli *et al.*, 2020; Albuquerque *et al.*, 2013; Vidaletti *et al.*, 2021). O uso de diferentes espécies de cobertura, solteiras ou em consórcios, tem-se mostrado benéfico no incremento dos estoques de carbono (C) orgânico e da disponibilidade de nutrientes, permitindo melhor redistribuição no perfil do solo em razão do aporte via sistema radicular (Sá *et al.*, 2014; Wolschick *et al.*, 2016; Albuquerque *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2017; Calegari *et al.*, 2013).

A efetividade na exploração do solo pelo sistema radicular das plantas cultivadas depende das características químicas do solo, especialmente da presença de nutrientes de baixa mobilidade na planta aportados em profundidade (Pauletti *et al.*, 2014) e do nível de acidez ao longo do perfil do solo, tornando-se potenciais limitadores na expressão morfofisiológica máxima das culturas. No sistema plantio direto, embora a aplicação superficial de calcário, sem incorporação, seja uma prática eficaz na correção da acidez e no aumento da disponibilidade de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas camadas superficiais do solo, o seu efeito é lento na melhoria do subsolo (Caires *et al.*, 2002; Rodrighero *et al.*, 2015). A aplicação de gesso agrícola sobre a superfície do solo tem sido apontada como uma alternativa viável na melhoria das condições químicas do subsolo para o crescimento radicular das plantas por aumentar os níveis de Ca e enxofre (S) e reduzir a toxicidade de alumínio (Al), favorecendo a produtividade das culturas

(Caires; Guimarães, 2018), especialmente em condições de deficiência hídrica (Zandoná *et al.*, 2015; Basso *et al.*, 2015).

Considerando que o recurso solo é limitado e que alguns de seus componentes requerem períodos prolongados para serem restaurados, a previsão do grau de perturbações ambientais provocadas pelo manejo inadequado das atividades agrícolas se torna essencial para a obtenção de sistemas produtivos com maior sustentabilidade (Stefanoski *et al.*, 2013). A determinação de espécies que compõem a rotação de culturas juntamente com práticas que visem a melhoria do perfil do solo são ferramentas cruciais para a manutenção da qualidade do solo e do sistema de produção em sistema plantio direto. Este trabalho teve o objetivo de avaliar as alterações químicas do solo e o comportamento da soja frente à diferentes rotações de cultura, sem e com aplicação superficial de gesso agrícola, em sistema plantio direto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da rotação de culturas e do uso do gesso agrícola na melhoria do perfil do solo e na performance produtiva da soja em sistema plantio direto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência da rotação de culturas e da aplicação de gesso agrícola no teor foliar de nutrientes, no rendimento de biomassa seca e na produtividade de grãos de soja.
- Analisar as alterações químicas do perfil do solo em função das rotações de culturas e da aplicação de gesso agrícola.
- Verificar se o efeito da aplicação de gesso na melhoria do perfil do solo é influenciado pela diversidade de espécies na rotação de culturas.

3 HIPÓTESE

A hipótese do presente estudo é que a adoção de maior diversidade de espécies na rotação de culturas associada com o uso de gesso agrícola melhorem as condições químicas do perfil do solo e a performance da soja cultivada em sistema plantio direto.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 TÓPICOS SOBRE INTERAÇÕES NUTRICIONAIS NO SOLO E INFLUÊNCIA EM PLANTAS CULTIVADAS

A ocorrência de variações significativas na fertilidade do solo e na expressão dos seus componentes mineralógicos é decorrente de uma série de fatores de influência conjunta, destacando-se o material de origem, a posição no relevo e a idade dos solos (Almeida *et al.*, 2018). No Brasil, existe grande diversidade de solos em sua extensão continental, sendo a maioria altamente intemperizados, com alta acidez e baixa fertilidade natural, apresentando potenciais e limitações em função do uso e das práticas de manejo adotadas (Santos *et al.*, 2018). Por outro lado, pela sua formação e por influência de sua mineralogia, os solos altamente intemperizados e com carga variável apresentam propriedades agronomicamente desejáveis como boa profundidade, estrutura estável, boa porosidade e alta permeabilidade (Fontes *et al.*, 2001).

Em áreas agricultáveis no Estado do Paraná, a classe de ocorrência expressiva e dominante de solos pertence aos Latossolos, com ocupação de quase 62.000 ha ou cerca de 34% da área total do Estado, seguida da classe dos Cambiosolos, Neossolos, Nitossolos e Argissolos (Bhering *et al.*, 2007). Na maioria desses solos, visto a natureza altamente intemperizada e ácida, predomina uma fração coloidal representada por um conjunto de partículas de argila e húmus, mas que, devido a dimensões extremamente pequenas e de comportamentos semelhantes, normalmente próximas a 1 μm , e com grande superfície específica, permitem a ocorrência de processos de adsorção de íons com formação da dupla camada iônica e de trocas com a solução do solo (Brady; Weil, 2013).

Conforme o tipo e o arranjo de seus elementos em suas estruturas cristalinas, em especial, das variadas ligações entre íons de oxigênio ou hidroxilas ligadas ao silício, ferro e/ou alumínio para formação de estruturas tetraédricas e octaédricas, as argilas presentes no solo demonstram agrupamentos com comportamentos diferenciados, destacando-se principalmente a caulinita, illita, esmectita, vermiculita, óxidos de ferro e alumínio (Lepsch, 2021). A ocorrência de minerais de argila 2:1 de carga permanente negativa em solos demonstram importantes propriedades de expansão e substituição isomórfica no processo de cristalização, permitindo uma fonte primária de cargas negativas, com valores aproximados de capacidade de troca de cátions (CTC) de 40 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, 120 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e 150 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para a illita, montmorilonita e vermiculita, respectivamente. Entretanto, cabe obtemperar que, devido suas estruturas frágeis,

são facilmente intemperizados e tornam-se raras em regiões tropicais e subtropicais (Raij, 2019).

Os solos brasileiros, em sua grande maioria, são constituídos de minerais de argila do grupo das caulinitas, que possuem pouca ou negligenciável substituição isomórfica do átomo central nas lâminas tetraedrais e octaedrais, o que confere a esse mineral baixa CTC, entre 3-15 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, e limitada reserva de nutrientes (Costa *et al.*, 2019; Bayer; Bertol, 1999; Raij, 2019; Costa *et al.*, 2014). Apesar da baixa contribuição, a existência dos grupamentos silanol (Si-OH) e aluminol (Al-OH) nas bordas das lamelas da caulinita, permite adsorver moléculas acumuladas nas interfaces através de ligações de hidrogênio (H^+), podendo haver a dissociação ou associação do íon H^+ nesses grupos hidroxilados, gerando cargas negativa e positiva, respectivamente, nas arestas, dependendo do valor de pH do meio (Mangoni *et al.*, 2015). Em alguns estudos realizados por Melo *et al.* (2001) e Bortoluzzi *et al.* (2007) verificou-se a formação de interestratificado entre argilominerais da classe das micas e esmectitas, originados por herança do material parental, intercalados em cristais e protegidos do intemperismo na estrutura da caulinita, sendo uma importante fonte de ocorrência de potássio (K) e Mg nos solos.

Na região dos Campos Gerais, situada na borda do Segundo Planalto Paranaense e no reverso imediato da Escarpa Devoniana, sob transição entre importantes biomas de campos de altitude, floresta com araucária e cerrado, os solos manifestam sedimentos provenientes das formações Furnas, Ponta Grossa e Itararé (Melo *et al.*, 2011). Considerando a composição mineralógica dos solos da região da Bacia intracratônica do Paraná, denota-se a distribuição fortemente heterogênea de quartzo, caulinita e illita, originária dos arenitos afetados por extensa dissolução/caulinização de feldspato, mica e argila detrítica (Ross, 1998). Além disso, os solos do Estado do Paraná, em decorrência do intenso intemperismo em regiões de clima tropical e subtropical, em sua maioria, apresentam, além das argilas cauliniticas, elevados teores de óxidos de ferro e alumínio em sua fração argila (Briedis *et al.*, 2012). Entre os óxidos e hidróxidos de ferro presentes na fração argila, a goethita e a hematita são os mais abundantes entre minerais de carga variável e estudados por sua ampla variação existente nas condições pedogenéticas de formação dos solos, especialmente, devido ao material de origem (Souza Junior *et al.*, 2010). Na estrutura da classe desses coloides não silicatados, devido apenas a existência da lâmina octaédrica, as substituições isomórficas raramente ocorrem, portanto, não apresentando grandes quantidades de cargas negativas (Brady; Weil, 2013).

De modo geral, o pH do solo e a força iônica do meio demonstram influência significativa nas alterações na densidade de carga elétrica da superfície dos minerais de carga variável, decorrente da dissociação de H^+ de grupos hidroxílicos, aumentando assim as cargas

negativas e a adsorção de nutrientes (Alleoni *et al.*, 2005; Dias *et al.*, 2003). Em razão da alta atratividade de seus grupos funcionais pelo H^+ , os óxidos de ferro e alumínio denotam elevado ponto de carga zero (PCZ) (Briedis *et al.*, 2012). Segundo Fontes *et al.* (2001), a variação dos valores de PCZ dos vários minerais do solo parece depender essencialmente da natureza acídica dos diversos grupamentos hidroxílicos que aparecem em suas superfícies, com valores de PCZ variando de 2 a 4 para alguns óxidos de Si e Mn até 8 a 10 para alguns óxidos de Fe e Al, inferindo diferentes capacidades de ionização de H^+ nas fases expostas dos minerais.

Segundo estudos conduzidos por Bortoluzzi *et al.* (2015), a determinação dos teores de argila, de sesquióxidos e do índice de pH do solo permite uma boa previsão das capacidades de adsorção e dessorção de fósforo (P) do solo. A adsorção de P pela fração inorgânica do solo pode ser explicada pela presença de minerais argilosos da classe dos óxidos, como a goethita, ferrihidrita e gibbsita.

Considerando a dinâmica do P do solo, observa-se a presença de dois grandes grupos, dependendo da natureza do composto a que está ligado, sendo: (i) P inorgânico (P_i) e (ii) P orgânico (P_o). O P_i pode ser encontrado ligado aos grupos funcionais silanol e aluminol das arestas das argilas silicatadas e nos R-OH dos oxihidróxidos de ferro e alumínio e, inclusive, adsorvido à matéria orgânica do solo através de pontes de cátions. Com o passar do tempo, pode ocorrer o “envelhecimento” do P adsorvido, cujas ligações tendem à especificidade, formando compostos binucleados ou ainda a penetração do fosfato nas imperfeições do mineral cristalizado, resultando em maior estabilidade e menor possibilidade de dessorção do fosfato (Santos *et al.*, 2008). Zambrosi *et al.* (2007, 2008) evidenciaram a presença de Al^{3+} no solo como um fator de alta influência na disponibilidade de fosfato na solução do solo, devido às fortes interações com a formação da espécie química $Al-H_xPO_4^x$.

O P é um fator limitante para o crescimento das plantas, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados. As plantas têm vários mecanismos para superar a baixa disponibilidade de P no solo. As substâncias húmicas podem reduzir a adsorção de fosfato nas superfícies de óxidos e aumentar a disponibilidade de P no solo (Jindo *et al.*, 2016). Além disso, segundo Lambers *et al.* (2006), a consequência evolutiva do declínio nos níveis de disponibilidade de P é uma gama diversa de espécies de plantas com adaptações radiculares com notável capacidade de adquirir P do solo pouco disponível em resposta a gradientes de difusão, como resultado da absorção pelas raízes das plantas, ou quimicamente deslocado pelos exsudatos das raízes. Cabe salientar que, em condições naturais, parte da ferrihidrita pode interagir com a matéria orgânica do solo, bloqueando os locais de adsorção de P pelo mineral (Bortoluzzi *et al.*, 2015). Além disso, os compartimentos da matéria orgânica demonstram

capacidade de formar complexos com potencial de adsorver P e mantê-lo mais solúvel (Cotrufo *et al.*, 2015; Hayes; Swift, 2020; Pavinato; Rosolem, 2008; Jindo *et al.*, 2016). Contudo, em solos manejados sob sistemas de cultivo intensivos com declínio do teor de matéria orgânica, os locais de adsorção de P da ferrihidrita tornam-se disponíveis, adsorvendo maior quantidade de P e afetando diretamente a quantidade de fertilizante P necessária para suprir a necessidade nutricional das culturas (Bortoluzzi *et al.*, 2015; Rodrigues *et al.*, 2022).

Em solos tropicais, os principais materiais responsáveis pela geração de cargas elétricas variáveis são a caulinita, a matéria orgânica e os sesquióxidos de ferro e alumínio (Dias *et al.*, 2003; Costa *et al.*, 2019). No caso da matéria orgânica, a carga elétrica variável é sempre negativa e tem sua origem na dissociação de H⁺ das hidroxilas nos grupamentos carboxílicos e fenólicos presentes em ácidos orgânicos (Fontes *et al.*, 2001; Pavinato; Rosolem, 2008).

Em estudos comparando a CTC da matéria orgânica com a CTC da fração argila, Bayer e Bertol (1999) e Bortoluzzi *et al.* (2009) evidenciaram grande contribuição do C orgânico na CTC potencial do solo através da dissociação de grupos funcionais, principalmente os carboxílicos. A CTC da matéria orgânica ficou entre 225 e 399 cmol_c dm⁻³, enquanto a CTC da fração argila foi de aproximadamente de 23 cmol_c dm⁻³. Além do aumento expressivo na CTC e, conseqüentemente, na retenção de cátions (Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺), o acúmulo de matéria orgânica em solos com predominância de argila de atividade baixa pode ocasionar a complexação de H e Al, levando a uma estabilização do pH do solo devido a capacidade tamponamento da acidez (Ciotta *et al.*, 2003; Sá *et al.*, 2009; Pavinato; Rosolem, 2008; Carmo *et al.*, 2016).

Em solos agrícolas, o Mg revela uma série de funções importantes associadas a processos metabólicos nas plantas, como (i) fotofosforilação (formação de trifosfato de adenosina em cloroplastos), (ii) fixação fotossintética de CO₂, (iii) síntese de proteínas, (iv) formação de clorofila, (v) carregamento de substâncias pelo floema, (vi) partição e utilização de fotoassimilados e (vii) menor geração de espécies reativas de oxigênio. Conseqüentemente, muitos processos fisiológicos e bioquímicos críticos nas plantas são afetados negativamente pela deficiência de Mg, levando a prejuízos no crescimento e na produção, excepcionalmente, nos processos metabólicos dependentes da ativação da carboxilase ribulose 1,5-bifosfato (RuBP), enzima chave no desempenho fotossintético (Cakmak; Yazici, 2010).

Segundo Peng *et al.* (2018), além dos efeitos diretos sobre o crescimento das plantas, o fornecimento limitado de Mg também pode impactar a fixação biológica de N₂ em nódulos formados a partir de interações simbióticas entre leguminosas e bactérias rizóbias. De acordo com os autores, o Mg promove a realocação de carboidratos (amido e sacarose) de tecidos de parte aérea e acúmulos para a zona de infecção dos nódulos por rizóbios no sistema radicular,

favorecendo alterações morfológicas, como maior tamanho de nódulos, e enzimáticas, com a ativação da nitrogenase, revelando uma importante contribuição na melhoria do crescimento da parte aérea da soja durante o estágio inicial de crescimento. Todavia, sob baixos teores de Mg, a expressão alterada de genes (famílias SWEET e SUT) promovem o bloqueio do transporte de sacarose pelo floema e limitação de C durante o crescimento do nódulo.

O K também tem sido um nutriente capaz de mitigar a ocorrência de estresses em plantas, especialmente decorrentes do déficit hídrico. A falta de K induz uma forte diminuição no conteúdo hídrico e na área foliar, promovendo menores taxa de alongamento foliar e atrasos no desenvolvimento das plantas no estágio de florescimento, podendo resultar em reduções expressivas nas produtividades de grãos (Martineau *et al.*, 2017). Em estudos conduzidos por Santos *et al.* (2021) e Martineau *et al.* (2017) verificou-se que a fertilização do solo com K pode afetar mecanismos fisiológicos adaptativos nas plantas cultivadas em ambientes sob estresse abiótico de seca, relacionados ao aumento da eficiência de absorção pelo sistema radicular e da concentração do nutriente em tecidos foliares. Segundo os autores, a alta concentração de K nas folhas contribui para diminuir o potencial osmótico e ativar o comportamento isoídrico relativo à manutenção da atividade dos estômatos no processo de assimilação de CO₂, aumentando a eficiência do uso da água nas folhas através de menores taxas de transpiração e reduzindo a produção de espécies reativas de oxigênio nos cloroplastos.

A matéria orgânica do solo é um componente complexo, dinâmico e altamente benéfico que exerce grande influência, não apenas no comportamento do solo, mas também nas propriedades e funções do ecossistema. A sua constituição compreende diversos compartimentos de complexos orgânicos, sendo alguns deles denominados ativos, por incluírem compostos relativamente fáceis de serem decompostos, e outros passivos, contendo materiais estáveis, desempenhando uma função importante no armazenamento de água e na ciclagem de nutrientes. Estima-se que a matéria orgânica contém cerca de 60 a 80% de substâncias húmicas em sua constituição, com características estruturais variáveis de anéis aromáticos, alto peso molecular e aspecto amorfo (Brady; Weil, 2013).

A adoção de práticas conservacionistas como a rotação de culturas, através da promoção de incrementos de matéria orgânica no solo, possibilita aumentar a biodiversidade e a comunidade biológica do solo. O aumento da biodiversidade pode promover a presença de microrganismos do gênero *Trichoderma sp.* no solo, favorecendo a redução do pH da rizosfera pela excreção de ácidos orgânicos, como o ácido glucônico, fumárico e cítrico, solubilizando fosfatos e cátions como Fe²⁺, Mg²⁺ e Mn²⁺, a melhoria da fertilidade do solo e da produtividade das culturas (Mohammadi; Rokhzadi, 2012).

Fisiologicamente, o contato com substâncias húmicas pode desencadear outros efeitos com diferentes intensidades nas plantas cultivadas (Castro *et al.*, 2021). Entre os mecanismos, os ácidos húmicos também podem favorecer o metabolismo do C e do nitrogênio (N), aumentando a expressão da atividade de enzimas na glicólise e no ciclo de Krebs, a exemplo da H⁺-ATPase, com funções importantes na captação de íons e na formação de um gradiente eletroquímico essencial no mecanismo de crescimento em condições ácidas (Nunes *et al.*, 2019).

Independentemente da origem das diferentes frações de substâncias húmicas (ácidos húmicos, fúlvicos e huminas), o contato inicial de interação dessas substâncias com o sistema radicular permite a formação de um estado fisiológico induzido de eustress, caracterizado por efeito estressante nas plantas seguido de uma recuperação no desempenho fotossintético (Castro *et al.*, 2021). Castro *et al.* (2021) e Canellas *et al.* (2002) sugeriram que o contato dos ácidos húmicos com o sistema radicular das plantas, em condições ambientais de baixa disponibilidade hídrica, seria precursor de mecanismos de acúmulo de solutos nas raízes capazes de diminuir o potencial osmótico e o potencial hídrico radicular para a geração de um gradiente hídrico favorável à absorção de água. Além disso, alguns mecanismos de ativação da aclimação podem ocorrer na planta, como a biossíntese dos pigmentos de clorofila a e b no complexo antena, permitindo o aumento na funcionalidade da cadeia de transporte de elétrons e no desempenho fotossintético frente às condições adversas (Castro *et al.*, 2021, 2022).

Nunes *et al.* (2019), avaliando o efeito de ácidos húmicos na arquitetura da raiz de milho, relataram aumentos na biomassa fresca e a indução do crescimento radicular lateral, com aumentos significativos no número, diâmetro e comprimento das raízes, acompanhados por alterações em proteínas envolvidas no metabolismo energético, organização do citoesqueleto, processamento de RNA, transporte de proteínas e de vesículas. Segundo os autores, o contato do sistema radicular com os ácidos húmicos promove uma maior expressão de diferentes classes de proteínas solúveis nas raízes envolvidas em diferentes processos biológicos, como a glicólise, responsável pela formação dos constituintes estruturais do citoesqueleto, a atividade do fator de tradução para o processo de alongamento celular.

A estimulação das plantas cultivadas na presença de ácidos húmicos provenientes de resíduos vegetais, frente a condições adversas, revela-se favorecida através de alterações no centro regulatório chave de hormônios vegetais, modificadores de receptores de plantas e da atividade de fosfatases, como relatado por Souza *et al.* (2022). Segundo os autores, dentre as respostas ocasionadas pelos ácidos húmicos, as auxinas apresentaram o maior número de genes regulados positivamente em mecanismos particulares de homeostase celular, a exemplo das

aldo-ceto redutases, promovendo a desintoxicação de compostos menos tóxicos, como álcoois ou ácidos carboxílicos, e estimulando o crescimento vegetal.

A desidratação ocasionada pelo estresse hídrico afeta adversamente vários processos fisiológicos básicos durante o crescimento e desenvolvimento das plantas; dentre eles, o acúmulo de ácido abscísico (ABA) promove o fechamento estomático, a redução das trocas gasosas e a fotossíntese. Como consequência do desacoplamento dos fotossistemas induzido pela desidratação, os elétrons livres produzidos pelos centros de reação não transferidos para NADP⁺ promovem a geração de espécies reativas de oxigênio e a oxidação do DNA, lipídeos de membranas e pigmentos fotossintéticos. Todavia, para diferentes tipos de estresses ambientais, as espécies reativas de oxigênio são destoxificadas por proteínas especializadas, como DHN (deidrininas) induzidas por ABA, e antioxidantes, como o ascorbato hidrossolúvel e o tripeptídeo glutatona reduzida (Taiz *et al.*, 2017).

4.2 SISTEMA PLANTIO DIRETO

A adoção do sistema plantio direto no Brasil teve início pelo Estado do Paraná em 1972, através de iniciativas de produtores do município de Rolândia que buscavam mitigar os impactos da erosão no solo, causados pela adoção de práticas de manejo convencionais, e aumentar o rendimento das culturas de grãos e forragens (Molin, 2008). Devido ao sucesso obtido, o sistema plantio direto foi difundido para outras regiões do Paraná e do Brasil, acompanhado da expansão dos sistemas de cultivo à base de soja, estando atualmente presente em 33 milhões de hectares de áreas em cultivos anuais (Fuentes-Llanillo *et al.*, 2021).

A implementação do sistema plantio direto baseia-se na aplicação de um conjunto de técnicas relativas ao revolvimento mínimo do solo, à manutenção permanente da cobertura do solo com resíduos vegetais e à rotação de culturas (Moraes *et al.*, 2017; Weirich Neto *et al.*, 2006). A partir da adoção dos princípios básicos, desde que seguidos adequadamente, o sistema plantio direto tem proporcionado benefícios em curto e longo prazos, caracterizando-se como alternativa de produção econômica e sustentável, assim como solução para problemas ambientais em áreas de produção agrícola, como o processo erosivo, a lixiviação de nutrientes e a perda de insumos químicos para cursos hídricos (Salomão *et al.*, 2020; Tiecher *et al.*, 2017).

O plantio direto enquadra-se no conceito de sistema devido às interações que ocorrem nos diversos níveis culturais, biológicos e entre operações mecânicas, revelando diferentes fases de evolução no decorrer do tempo. Na fase de implantação, as práticas do sistema plantio direto permitem o início da reagregação e do rearranjo da estrutura do solo e, sob adoção contínua dos

fundamentos básicos, as práticas permitem que o sistema evolua para uma fase de transição, proporcionando aumentos na disponibilidade de P e início de acúmulo de matéria orgânica no solo. Os reais benefícios do sistema plantio direto são obtidos a partir da fase de consolidação, observando-se maior estabilidade da densidade do solo, acúmulo de palhada e do conteúdo de C no solo, responsáveis pela melhoria da ciclagem de nutrientes e do armazenamento de água no solo (Sá *et al.*, 2004, 2014, 2019).

Evidentemente, a adoção de práticas adequadas de manejo conservacionista permite a manutenção ou mesmo o acúmulo de C no sistema solo-planta, exercendo um papel fundamental sobre a emissão de gases do efeito estufa e consequentes mudanças climáticas globais (Carvalho *et al.*, 2010). O grau de esgotamento e o potencial para restauração dos estoques de C no solo, semelhante à ocorrência sob condições naturais, dependem de fatores ambientais relativos à textura, mineralogia e propriedades no solo, do clima da região agrícola e, essencialmente, da adoção de práticas de gerenciamento associadas à quantidade, diversidade e frequência de entrada de resíduos vegetais no sistema produtivo por meio de sistemas radiculares e da estrutura aérea das plantas (Ferreira *et al.*, 2018; Briedis *et al.*, 2016).

Avaliando diferentes sistema de manejo do solo, taxas de adubação nitrogenada e espécies de cobertura do solo em um período de 15 anos, Mazzoncini *et al.* (2011) observaram que, na camada de 0–30 cm, houve aumento de 21% no teor de C no solo conduzido sob sistema plantio direto, correspondendo a um ganho de $0,61 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e redução de 2% no teor de C no solo manejado em sistema de preparo convencional, correspondendo a uma perda de $0,06 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Além disso, os autores relataram mudanças apreciáveis no conteúdo de N total na camada de solo de 0–30 cm; em média, o sistema plantio direto aumentou o conteúdo de N total em $0,04 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto o CT diminuiu o conteúdo de N total na mesma proporção.

Sá *et al.* (2009), avaliando o efeito do preparo mecânico do solo e a cronossequência de idade da adoção do sistema plantio direto na fertilidade de Latossolos argilosos localizados na região Centro-Sul do Paraná, relataram incrementos no teor de C com a adoção do sistema conservacionista que resultaram em aumento na carga líquida negativa (ΔpH), atribuído à estabilidade de partículas primárias do solo e à liberação de ácidos carboxílicos e fenólicos do C orgânico no estado estacionário. Os autores ainda evidenciaram aumento na CTC, na razão de $0,37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para cada g de C por kg de solo, e alto impacto dos resíduos culturais na manutenção de nutrientes como de P e K ao longo do perfil do solo.

Estudos realizados por Briedis *et al.* (2016) avaliando o potencial de armazenamento de C sob diferentes profundidades de solos intemperizados em regiões tropicais, mostraram maior eficiência de acumulação de C na camada mais superficial de 0-20 cm, mas que também

foi a camada de solo mais propensa às emissões de CO₂ em comparação com as camadas subsuperficiais do solo, as quais apresentaram menor mineralização e maior proteção de C pela atividade de argilas, devido à alta capacidade de ligação de óxidos de Fe e Al em profundidade no solo. Os autores ainda salientaram que, ao longo do experimento, a saturação de C não foi alcançada, sendo a escassez de nutrientes em camadas profundas do solo, especialmente P, Ca²⁺ e Mg²⁺, a força motriz que limitou a maior atividade microbiana e a eficiência de acúmulo de C.

O sistema plantio direto associado com a rotação de culturas influencia a formação, reorganização e estabilização dos agregados no solo por meio do contínuo aporte de resíduos vegetais e de C no solo (Canalli *et al.*, 2020b). Por sua vez, a formação de uma ligação mais forte entre compostos de C com minerais de argila, presentes em regiões tropicais e subtropicais, ao longo do tempo, possibilita a criação de complexos organominerais mais humificados, macroagregados resilientes com meia-vida mais longa de C e estrutura de solo mais estável (Sá *et al.*, 2022) para o movimento livre da água no perfil e disponibilidade hídrica em períodos de estiagem (Mazurana *et al.*, 2011). Além disso, pela presença resíduos vegetais e de plantas de cobertura, a cobertura do solo possibilita a redução de perdas de água e de emissão de C provenientes de frações mais lábeis e altamente voláteis, sujeitas ao fluxo ascendente para fora do perfil do solo, atuando como uma barreira física (Sá *et al.*, 2022).

Silva *et al.* (2006), avaliando a dinâmica da água quanto à capacidade de interceptação e o escoamento superficial na presença de resíduos vegetais de milho e soja em sistemas convencional de preparo e plantio direto, evidenciaram diferenças entre as perdas de água da chuva através do escoamento superficial no sistema plantio direto em eventos de precipitação ultrapassando 18 mm e que, a partir desse valor, 19% do total precipitado foi escoado, enquanto no sistema convencional, perdas de água foram verificadas quando os eventos hídricos ultrapassaram 8 mm (40% do porcentual escoado). Nesse sentido, os autores relataram a atuação da presença de cobertura vegetal como uma camada dissipadora de energia cinética das gotas de chuva, diminuindo as perdas por erosão, e também como isolador térmico, diminuindo as perdas por evaporação do solo para a atmosfera pela interceptação de radiação solar.

Segundo Ferreira *et al.* (2018), um aspecto relevante na contribuição dos estoques de C em macroagregados é a maior diversificação de espécies para aporte contínuo de resíduos culturais no solo, permitindo incrementos nos estoques de C particulado responsáveis pela proteção interna de polissacarídeos e compostos aromáticos, e pela criação de nichos de proteção entre os agregados. Os autores observaram que o manejo cultural do solo com maior frequência de soja em relação ao milho proporcionou menor recuperação de C quando

comparado com a maior frequência de milho na rotação de culturas ao longo de 20 anos, com taxas de recuperação de 58,3% e 73,1%, respectivamente.

A escolha das espécies no sistema de culturas de cobertura também é importante promotora de modificações na fauna edáfica e de atributos microbiológicos no solo (Almeida *et al.*, 2016). Wozniak (2019), comparando o efeito da rotação de culturas e da monocultura de cereais no rendimento de grãos e palhada de trigo de inverno, assim como na qualidade química e biológica do solo, relatou reduções no rendimento de grãos (32%), nos teores de C orgânico (33,1%) e N total (16,5%), e na presença de minhocas (31%) no solo em monocultura.

Para Bartz *et al.* (2010), a presença de minhocas contribui para o aumento no teor de C orgânico total, permitindo maior microagregação, e na qualidade química do solo, por melhorar a disponibilidade de micronutrientes, como Zn, Cu e Mn, bem como a complexação de Al pelos ácidos orgânicos presentes na constituição de coprólitos. As minhocas ainda revelam mecanismos relacionados com crescimento das plantas através da produção de substâncias húmicas, induzindo sítios mitóticos em zona de diferenciação de alongamento e a proliferação acentuada de raízes laterais, assim como favorece a presença de grupos de auxinas trocáveis na macroestrutura do coprólito e liberada por mudanças de polaridade no solo (Canellas *et al.*, 2002).

4.3 ROTAÇÃO DE CULTURAS

Uma das premissas do sistema plantio direto é a manutenção da cobertura do solo que está relacionada à quantidade e qualidade da biomassa produzida pelas culturas. A rotação de culturas, incluindo culturas de cobertura, é uma estratégia de longo prazo que permite a cobertura do solo e promove efeitos positivos na qualidade do solo, entre outros benefícios (Canalli *et al.*, 2020ab).

No Brasil, a diversidade de espécies passíveis de integrar modelos de produção é ampla, sendo o planejamento dependente das características regionais. A alternância de espécies vegetais de diferentes famílias e, até mesmo, cultivares, com diferenciado grau de suscetibilidade a pragas e doenças, associada à capacidade competitiva por recursos ambientais mediante o contato com plantas daninhas, são aspectos desejados no planejamento do modelo de produção, potencializando a redução de uso de insumos e contribuindo para a sustentabilidade agrícola (Denardin *et al.*, 2012).

De forma geral, o Estado do Paraná adota dois sistemas de produção, caracterizados como sistemas de sucessão de culturas, com o predomínio de soja no verão e de trigo no inverno

para a metade sul e sudoeste (região subtropical) e de soja no verão e milho safrinha no inverno nas regiões norte e oeste do Estado (região de transição climática). Para tanto, essa divisão é determinada por um zoneamento climático das culturas, baseado em fatores como a precipitação pluvial, a evapotranspiração potencial, a capacidade de água disponível no solo e a probabilidade de ocorrência de baixas temperaturas durante a fase reprodutiva das culturas de inverno (Franchini *et al.*, 2011).

Em adição às culturas de grãos no verão, o cultivo de espécies de cobertura tem sido cada vez mais presente, envolvendo a presença de uma gramínea ou leguminosa anual, bianual ou perene, ou a combinação de duas ou mais espécies cultivadas, em um ciclo de dois a três meses ao ano, alternado com dois ciclos de culturas econômicas ou em consórcios com lavouras anuais e perenes, nas ruas e entre as linhas de semeadura (Angeletti *et al.*, 2018). Entre os parâmetros utilizados na escolha de espécies para cobertura do solo, considera-se a adaptabilidade às condições edafoclimáticas, o potencial de produção e manejo da fitomassa, a reciclagem de nutrientes, os efeitos na qualidade física do solo, rusticidade, tolerância ao déficit hídrico e disponibilidade/qualidade de sementes (Alvarenga *et al.*, 2018; Cassol *et al.*, 2023; Giacomini *et al.*, 2003).

Na região Sul do Brasil, as espécies de outono-inverno que se destacam são a aveia-branca, a aveia-preta, o centeio, o trigo, o tremoço-azul e o azevém, com a utilização ligada à disponibilidade de sementes e à existência de cultivares adequados aos diferentes agroecossistemas (Cardoso *et al.*, 2015; Angeletti *et al.*, 2018; Bevilaqua, 2010; Giacomini *et al.*, 2003; Caires *et al.*, 2003; Franchini *et al.*, 2003; Teles *et al.*, 2017).

Dentre os vários cereais de inverno, o cultivo da aveia vem se firmando como uma importante alternativa de exploração agrícola, revelando qualidades agrônômicas de crescimento vigoroso e tolerância à acidez do solo que permitem uma elevada produção de fitomassa e/ou produção de grãos em sistema plantio direto (Castro *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2009). Além do cultivo solteiro da aveia preta, existe o consórcio com outras gramíneas e/ou leguminosas, a exemplo do azevém (*Lolium multiflorum*), ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), permitindo elevado potencial de proteção do solo pela permanência de resíduos na superfície, com aporte de matéria seca da parte aérea e de raízes que são capazes de absorver nutrientes em grandes profundidades no solo, os quais são acumulados no tecido vegetal e liberados para as culturas sucessoras pelo processo de decomposição (Santos *et al.*, 2009; Ziech *et al.*, 2015; Wolschick *et al.*, 2016; Canalli; Calegari, 2019).

A utilização da ervilhaca comum destaca-se como uma alternativa potencial para manejo de cobertura verde no inverno. Entre os motivos, destaca-se a capacidade de ciclagem

e acúmulo de nutrientes na biomassa seca com grande proporção de compartimentos mais facilmente decomponíveis, indicando o potencial destas espécies em disponibilizar nutrientes pela decomposição a partir dos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura implantada em sucessão. Quando comparado ao cultivo do milho antecedendo a cultura do trigo, a ervilhaca comum contribuiu com maior disponibilização de nutrientes no estágio de afilhamento do trigo, com aproximadamente 64 kg ha^{-1} de N, 42 kg ha^{-1} de K e 2 kg ha^{-1} de P. Em decorrência da elevada relação C/N dos resíduos vegetais, a cultura do milho revela baixa contribuição de N ao longo do ciclo da cultura (24 kg ha^{-1} de N após 100 dias) e baixa quantidade de P na porção mais prontamente decomponível (32,7%), levando aproximadamente 102 dias para liberar 50% do P no solo (Viola *et al.*, 2013).

Avaliando o uso de diferentes espécies de plantas de cobertura em um Cambissolo Húmico no Planalto Sul Catarinense, Wolschick *et al.* (2016) relataram a importância da introdução de gramíneas e leguminosas no aporte de biomassa para cobertura do solo e na disponibilização de nutrientes. Segundo esses autores, os cultivos de aveia preta e ervilhaca comum expressaram eficiência na cobertura do solo por resíduos vegetais relativa ao potencial de rendimento de massa seca, entre 9,91 e 9,14 t ha^{-1} , contudo, considerando a produção de biomassa seca de raízes em camadas superficiais do solo, a aveia preta demonstrou maior massa de raízes quando comparada com a ervilhaca comum, com 4,53 e 3,02 t ha^{-1} , respectivamente. Apesar do menor acúmulo de nutrientes nas raízes em relação à parte aérea, o cultivo dessas espécies de cobertura revelou boa eficiência na ciclagem de nutrientes através dos resíduos do sistema radicular, com quantidades de 1,49 e 2,08 kg ha^{-1} de Ca, 7,8 e 5,9 kg ha^{-1} de Mg, 4,0 e 4,2 kg ha^{-1} de P, e 63,3 e 24,1 kg ha^{-1} de K, respectivamente.

A manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo também se revela como uma reserva de nutrientes considerável, principalmente de K trocável, cuja disponibilização pode ser rápida e intensa, dependendo, dentre outros fatores, do regime de chuvas e da concentração do nutriente no tecido vegetal. Assim, no que diz respeito ao aproveitamento de K pelas culturas em um sistema de rotação, a liberação diferenciada de K entre as espécies tem muito significado, visto que algumas delas, como é o caso da aveia e do triticale, permitem disponibilizar valores acima de 20 kg ha^{-1} de K em períodos iniciais de crescimento da cultura subsequente, atribuídos à maior concentração deste nutriente no tecido vegetal do triticale e da aveia, ou seja, 48,6 e 36,4 g kg^{-1} de K, respectivamente (Rosolem *et al.*, 2003).

Mazzoncini *et al.* (2011), avaliando o uso de espécies de cobertura do solo durante um período experimental de 15 anos, observaram que as culturas de cobertura leguminosas promoveram maiores incrementos nos estoques de C, variando entre 0,17 e 0,43 $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$,

através de aumentos na concentração de C em 10% na camada mais superficial de 0-10 cm e em 8% na camada mais profunda de 10-30 cm, quando comparados com o sistema sem cobertura vegetal. Nesse contexto, o processo de sequestro de C no solo requer grande aporte de resíduos vegetais e a transformação em substâncias húmicas, mediante reações microbianas, tornando-se protegidas química ou fisicamente na fração mineral. A adição de N por meio de fertilização e/ou plantas fixadoras de N torna-se um meio viável de estimular o processo de humificação (Prescott, 2010).

Segundo estudos realizados por Teles *et al.* (2017), embora os cultivos de aveia e azevém com a finalidade de cobertura do solo possibilitem aumentar a produtividade das culturas em sucessão através do aporte de matéria seca aérea, do acúmulo de matéria orgânica e da reciclagem de nutrientes no solo, em destaque para o P nas camadas superficiais, a capacidade de absorção para P revela-se limitada a frações moderadamente lábeis e inorgânica lábil, com efeito pouco pronunciado sobre a disponibilidade total de P. Dessa forma, acúmulos de P lábil e não lábil no solo, comumente observados nas camadas próximas à superfície, são advindos principalmente da aplicação de fontes de fertilizantes fosfatados, enfatizando que os solos argilosos brasileiros são um sumidouro do P inorgânico do fertilizante e que mobilidade de P no perfil do solo é muito baixa (Teles *et al.*, 2017).

Corroborando com os achados de Teles *et al.* (2017), os estudos conduzidos por Pavinato *et al.* (2017) revelaram que a capacidade de absorção de P por diferentes culturas de cobertura apresenta ampla variabilidade, podendo ser determinada pelo rendimento de matéria seca. De acordo com esses autores, a adoção de espécies como aveia preta e azevém para cobertura do solo promove de forma mais eficaz o P residual remanescente através da reciclagem dos fertilizantes fosfatados aplicados nos cultivos de verão anteriores. Esses resultados sugerem que a reciclagem biológica pode promover incremento na absorção média de P pelo milho no estágio de pendramento, como observado na presença de resíduos vegetais de azevém, com aporte de aproximadamente 21 kg ha⁻¹, mas que, todavia, pode alcançar valores próximos de 62,2 kg ha⁻¹ com o uso de diferentes espécies e de fertilização residual com P da cultura do milho ao longo dos anos.

Para Giacomini *et al.* (2003), embora a menor capacidade de produção de biomassa seca verificada pela cultura da ervilhaca, comparada com a aveia, ambas as espécies revelaram capacidade semelhante como promotoras de ciclagem de nutrientes no solo através de acúmulos apreciáveis nos tecidos vegetais, de 50 a 85 kg ha⁻¹ de K, e 8 a 24 kg ha⁻¹ de P. Os autores ainda observaram que a melhoria da performance da aveia comparada com o uso de leguminosas pode

ocorrer quando ela é antecedida pela cultura da soja, com promoção de maior disponibilidade de N no solo.

Franchini *et al.* (2003), avaliando a composição orgânica dos adubos verdes comumente utilizados nas rotações de culturas em plantio direto no Sul do Brasil, considerando diferentes estágios de desenvolvimento das espécies de cobertura e sua relação com a mobilização de cátions polivalentes no solo, observaram que a partir do florescimento, os extratos de aveia no solo causaram incrementos no pH e nos teores de cátions (Ca, Mg e K), e decréscimos na acidez ativa relacionados com a lixiviação de Al em complexos orgânicos (ácido málico e ácido aconítico) com carga nula. Avaliando o crescimento radicular durante o estágio inicial da cultura do trigo como indicador biológico no sistema, os resultados obtidos demonstraram que o contato com extratos vegetais de adubos verdes favoreceu o crescimento das raízes.

Tiecher *et al.* (2017) avaliaram a qualidade química do solo em um experimento de longa duração sob sistema plantio direto no Estado do Paraná e verificaram maiores incrementos de biomassa seca aérea considerando o emprego de aveia preta e ervilhaca comparados com trigo. Além disso, apesar de os cultivos de trigo, ervilhaca e azevém terem proporcionado teores considerados adequados de P e K, em adição à maior produção de biomassa, o cultivo de aveia preta resultou em maior disponibilidade de P na camada de 0-10 cm e de K na camada de 0-20 cm em comparação aos demais tratamentos de inverno. Não foram observadas diferenças significativas nos níveis de pH e nos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} no solo de acordo com a adoção de diferentes espécies de cobertura.

Caires *et al.* (2006) relataram a importância da inclusão da aveia preta para promover acúmulo de resíduos na superfície do solo responsáveis pela ciclagem de K nas camadas superficiais no solo e para a nutrição foliar de P, Ca e Mg, e no rendimento de grãos de milho. Na cultura da soja, a presença da cobertura de aveia preta proporcionou incrementos nos teores foliares de N e P, e redução de Mn nas folhas, sem causar reflexos no rendimento de grãos.

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é outra espécie amplamente cultivada na região Sul do Brasil e uma excelente alternativa para a produção de grãos durante o inverno, com importância na rotação de culturas e com grande demanda, cujo consumo praticamente não varia em relação às oscilações de seus preços. Todavia, a elevação dos custos de produção internos relacionados às práticas de manejo e adubação, associada com a produção de trigo na Argentina, bem mais barata, tem gerado dificuldades para os produtores atingirem o potencial produtivo pretendido em grande parte das áreas cultivadas com o trigo no Brasil (Mattuela *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2015). A prática de rotação de culturas com espécies de adubação verde e culturas

comerciais, tanto no inverno como no verão, pode promover um amplo conjunto de benefícios agronômicos, sendo alguns resultados positivos observados já nas primeiras safras, tanto nos atributos físicos e químicos do solo quanto nos aspectos econômicos, permitindo reduzir custos com insumos agrícolas, mão de obra, operações com máquinas/equipamentos e aumentar a produtividade de commodities por área plantada devido à diversificação de espécies (Cruz; Magalhães, 2013; Volsi *et al.*, 2020; Mello; Eeperancini 2015).

Alguns estudos que avaliaram a performance na produção de biomassa seca pela cultura do trigo em sistema plantio direto revelaram alta capacidade de contribuição pelos resíduos vegetais da parte aérea, podendo atingir até 10477 kg ha⁻¹ em pleno florescimento (Carvalho *et al.*, 2015; Canalli *et al.*, 2020a). Todavia, tratando-se de uma cultura com interesse comercial de grãos, sua real contribuição com o aporte de biomassa acaba se tornando reduzida por causa da senescência e queda de folhas, e da exportação dos grãos. Pauletti *et al.* (2004) verificaram que a exportação de nutrientes pela cultura do trigo foi em média de 20,1 kg ha⁻¹ de N, 3,2 kg ha⁻¹ de P, 3,5 kg ha⁻¹ de K, 0,2 kg ha⁻¹ de Ca e 0,8 kg ha⁻¹ de Mg para cada tonelada de grãos produzida.

Em um experimento realizado em Latossolo Bruno álico no município de Guarapuava, PR, adotando a cultura do trigo como espécie base dos sistemas produtivos durante um período de 10 anos, Santos *et al.* (1998) observaram que a severidade de doenças no sistema radicular da cultura do trigo (mal-do-pé e da podridão comum) se diferenciou entre os sistemas de rotação, manifestando-se mais elevada na monocultura, que levou a reduções lineares no rendimento de grãos. Todavia, a maior diversificação de culturas na rotação, com inserção de espécies não suscetíveis/hospedeira ao patógeno, promoveu redução de riscos ao desenvolvimento das doenças e às condições ambientais adversas, assim como aumento na produtividade de grãos. Os maiores potenciais produtivos de grãos de trigo foram observados em sistemas que reduziram a frequência de entrada do trigo para 25% a 33% no inverno, utilizando-se alternativamente as culturas da aveia, ervilhaca e linho.

O manejo de gramíneas para cobertura do solo, a exemplo da aveia, do milho e da cevada enquanto culturas comerciais dentro de um sistema de rotação, também se faz oportuno em razão da necessidade de produção e elevada capacidade de aporte de biomassa vegetal. Essas espécies são responsáveis por produzir um grande volume radicular e explorar grandes profundidades, conseqüentemente, acumular maior teores de nutrientes em tecidos da parte aérea para disponibilizar para as culturas em sucessão (Wolschick *et al.*, 2018; Caires *et al.*, 2006; Locatelli *et al.*, 2019; Canalli; Calegari, 2019). Considerando a manutenção dos estoques da matéria orgânica em regiões subtropicais, a inclusão do milho e da cevada na rotação de

culturas permite aportar resíduos vegetais em quantidade e qualidade mínimas para manter a sustentabilidade do sistema plantio direto, produzindo, em média, 9670 kg ha⁻¹ e 7470 kg ha⁻¹ de biomassa de parte aérea, respectivamente (Canalli *et al.*, 2020a; Amado *et al.*, 2006; Holanda *et al.*, 2021). Os benefícios da inserção do milho na rotação de culturas se tornam ainda mais marcantes quando se trata da ciclagem de nutrientes facilmente lixiviados, como é o caso do N e do K em camadas profundas do solo, nas quais as raízes de leguminosas, por exemplo a soja, dificilmente absorveriam (Kappes *et al.*, 2021).

Em um estudo que avaliou a retenção de água pela cobertura morta de milho e a sua influência no crescimento e produção do feijoeiro irrigado em sistema plantio direto, Pereira *et al.* (2015) verificaram acréscimos no índice de área foliar, na altura e na massa seca da parte aérea das plantas de feijão à medida que se aumentaram os níveis de cobertura depositada sobre o solo. Os autores observaram que a presença de 12 t ha⁻¹ de resíduo vegetal de milho sobre a superfície do solo proporcionou melhor aproveitamento da água pela cultura subsequente, auxiliando a relação solo-água-atmosfera por meio da redução da temperatura e da evapotranspiração, e aumento da permanência da umidade no perfil do solo após evento de precipitação em todos os estádios de desenvolvimento da cultura.

Rodrigues *et al.* (2022), avaliando a capacidade de sequestro e estabilização de C em solos conduzidos em diferentes sistemas de cultivo sob plantio direto de longo prazo, reportaram elevados aportes de C com a inclusão de milho, aveia e leguminosas tropicais. Considerando os teores e o nível de saturação total de C da fração silte mais argila, os autores observaram que a capacidade remanescente de sequestro de C até 20 cm variou de 22,5 a 32,8 Mg C ha⁻¹, com grande participação na camada de 10–20 cm (58–75%). O maior nível de saturação de C associada aos minerais foi encontrado na camada de 0–2,5 cm, com teor de C de 42,3 ± 3,6 g C kg⁻¹, bem próximo da capacidade máxima de estabilização de C de 47,4 g C kg⁻¹ prevista pelo modelo. Esses resultados sugerem que o aporte de C pela parte aérea e pelas raízes é maior nos primeiros 5 cm dos solos sob plantio direto, enquanto a entrada de C em camadas mais profundas do solo é restrita e dependente da rizodeposição e de processos de bioturbação.

Em estudos envolvendo indicações técnicas para adubação fosfatada de culturas de grãos em Latossolos com longo histórico de plantio direto na região Centro-Sul do Paraná, Viera *et al.* (2015) relataram baixa eficiência das culturas de soja e trigo quando comparadas com o milho na conversão de P proveniente da adubação em rendimentos de grãos. Considerando as classes de teores baixo e médio de P no solo, os incrementos médios de soja e trigo ficaram entre 6,6 e 7,3 kg de grãos para cada kg de P₂O₅ aplicado, enquanto para o milho

o incremento médio foi de 19,9 kg de grãos para cada kg de P_2O_5 aplicado. Apesar da baixa eficiência no aproveitamento do P aplicado, a cultura do trigo demonstrou-se altamente exigente e responsiva ao nutriente juntamente com outros cereais de inverno, como a cevada e a aveia-branca, com teores críticos de P no solo de $8,2 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0-20 cm. Para as culturas de verão de soja e milho, os níveis críticos de P no solo (0-20 cm) ficaram próximos a $6,2 \text{ mg dm}^{-3}$ (Vieira *et al.*, 2015).

A cultura da soja também apresenta alta demanda de N em razão do alto teor de proteínas em seus grãos, em torno de 40%. Estima-se que, para produzir uma tonelada de grãos de soja, são necessários cerca de 80 kg de N, dos quais 60% são exportados pelos grãos. Essa demanda é atendida pela mineralização da matéria orgânica e, principalmente, por meio da fixação biológica do N_2 (FBN) realizada por bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, as quais retiram o N_2 da atmosfera e o reduzem à forma amoniacal nos nódulos radiculares (Nogueira; Hungria, 2013, 2014). Na safra 2022-2023, o cultivo da soja no Brasil alcançou uma produção de 154,6 milhões de toneladas de grãos e uma produtividade média de 3508 kg ha^{-1} .

Considerando a dinâmica da ciclagem de nutrientes no solo, a capacidade da soja em realizar interações mutualísticas com bactérias fixadoras de N_2 torna-se aplicável e relevante em práticas de manejo, com a rotação de culturas, onde a fixação biológica de N promoveria maior atividade da biota do solo e, conseqüentemente, acelerando a decomposição dos resíduos vegetais e o suprimento parcial nutricional das culturas em sucessão, como o trigo e a cevada (Hungria; Mendes, 2015; Canalli *et al.*, 2020a; Foloni *et al.*, 2015). A cultura da soja também pode contribuir no acúmulo de biomassa, através dos resíduos lignocelulósicos provenientes de folhas, caule e tecidos reprodutivos na maturidade fisiológica que permaneceram no solo após a colheita, aportando aproximadamente 6 t ha^{-1} de peso seco, nos quais estão presentes cerca de 4 kg de P, 78 kg de K, 103 kg de Ca, 41 kg de Mg, 8 kg de S, 195 g de Zn, 279 g de Mn, 214 g de B, 603 g de Fe e 24 g de Cu por hectare (Lenhani *et al.*, 2018; Bender *et al.*, 2013).

Estudos conduzidos por Souza *et al.* (2010) envolvendo variações na absorção de B, Cu, Fe, Mn e Zn durante o ciclo de desenvolvimento da soja revelaram que a disponibilidade de micronutrientes depende de alterações no pH do solo, particularmente na rizosfera. Com exceção do Cu, a acidificação do solo decorrente da maior atividade dos nódulos e maior fixação biológica de N_2 favoreceu o acúmulo de todos os demais micronutrientes nos tecidos das plantas, principalmente na transição entre os estádios vegetativos e reprodutivos. O conteúdo de Cu na planta apresentou uma curva semelhante à do acúmulo de matéria seca da parte aérea, visto sua afinidade com o átomo de N do grupo amino que atua como carregador desse nutriente no xilema e floema.

Segundo Calonego e Rosolem (2010), a rotação de culturas apresenta efeito gradual na melhoria da estrutura do solo. Em médio prazo, a soja em rotação com gramíneas apresenta maior crescimento radicular em profundidade como consequência da presença de bioporos e da diminuição da resistência à penetração em razão da atividade de sistemas radiculares vigorosos das plantas de cobertura do solo. Além do efeito físico, o aumento de bioporos promove economia de fotoassimilados na medida em que maiores teores de matéria orgânica são derivados de exsudatos radiculares ou decomposição de raízes mortas, atuando como reserva de água e nutrientes e reduzindo a fitotoxicidade de Al e Mn. Assim, em presença de períodos de baixa precipitação pluvial, observou-se maior alongamento radicular da soja até 40 cm sob a linha de semeadura e maior densidade de comprimento de raízes nas entrelinhas até 20 cm (Calonego; Rosolem, 2010).

Santos *et al.* (1998), avaliando a fertilidade do solo em diferentes sistemas produtivos, observaram uma relação entre teores de Al trocável no solo com os valores de pH no manejo do solo sob a sucessão trigo/soja, demonstrando maior acidez comparada com sistemas mais diversificados na camada de 5-10 cm. Contudo, após um período experimental de 10 anos, os autores observaram maior teor de P extraível na camada mais superficial do solo (0-5 cm) com o emprego da monocultura, de 12 mg dm^{-3} , comparado com sistemas mais diversificados, nos quais os teores de P variaram entre 6,4 e $7,1 \text{ mg dm}^{-3}$.

Estudos realizados por Molin (2008) com intuito de avaliar o rendimento de grãos e de fitomassa obtidos em diferentes subsistemas de produção na região dos Campos Gerais do Paraná, durante um período de 15 anos, mostraram rendimento médio de 3327 kg ha^{-1} de grãos de soja no subsistema de produção composto apenas pelos cultivos de trigo e soja. Contudo, promovendo a redução pela metade do número de safras de soja e trigo através da adoção de um sistema produtivo composto por maior diversificação de espécies, com a inclusão de outras culturas comerciais e de cobertura do solo, a exemplo das sucessões milho/ervilhaca, aveia/milho e azevém/milho, os rendimentos de grãos de soja aumentaram para 3609 kg ha^{-1} , 3573 kg ha^{-1} e 3412 kg ha^{-1} , respectivamente.

Outra cultura oleaginosa que vem ganhando destaque na agricultura é a canola (*Brassica napus* L. var. oleífera) em razão dos preços vantajosos e de sua adaptabilidade às condições edafoclimáticas da região Sul do Brasil (Kaefer *et al.*, 2014; Estevez *et al.*, 2014). Segundos resultados obtidos por Canalli *et al.* (2020), a inclusão da canola no sistema de rotação de culturas demonstra semelhança aos cultivos isolados e/ou consorciados entre diferentes espécies de Poaceae, permitindo incrementos na produção de fitomassa seca e menores taxas de decomposição de resíduos vegetais. Todavia, a canola apresenta alta demanda

nutricional, tornando-se recorrente práticas de fertilização ao longo do seu ciclo (Mohammadi; Rokhzadi, 2012), levando em alguns casos à acidificação do solo (Rosado *et al.*, 2014).

Avaliando as alterações químicas de um Latossolo Roxo distrófico, após sete anos de condução de um experimento com diferentes sistemas de rotação de culturas, Franchini *et al.* (2000) observaram que além das fontes nitrogenadas, a acidificação do solo pode decorrer com a inserção de plantas leguminosas mediante a prática da adubação verde. Além disso, também pode ocorrer redução no teor de Ca trocável em razão da alteração da carga líquida pela complexação de estruturas orgânicas e redução da energia de ligação com o complexo de troca, favorecendo a sua lixiviação para camadas subsuperficiais.

Considerando a dinâmica de nutrientes, alguns aspectos quanto à escolha de espécies em combinação com a canola devem ser considerados para a obtenção de maior sustentabilidade do sistema de produção. Estudos realizados por Mohammadi e Rokhzadi (2012) revelaram que a adoção de rotação de culturas mais otimizada, com a inclusão de maior diversidade de espécies através da adubação verde com leguminosas, antecedendo o cultivo da canola, forneceu mais N e outros nutrientes lixiviados através da decomposição dos resíduos vegetais, conseqüentemente, aumentando a qualidade de grãos da canola. Todavia, os autores observaram menores teores de N e S nos grãos de canola em sistemas de rotação menos diversificados, a exemplo da sucessão canola-trigo, atribuindo esse fato à menor exploração de nutrientes em maiores profundidades, levando à absorção e ao esgotamento dos nutrientes nas camadas superficiais.

A produção mais sustentável de canola em longo prazo deve incrementar com a maior diversidade do sistema de cultivo. Altos rendimentos de canola foram obtidos em locais que experimentaram temperaturas mais baixas com eventos de precipitação pluvial adequados e relativamente uniformes, associados com a inclusão de trigo ou cevada e ervilhas na rotação, permitindo também reduzir danos relacionados às pragas agrícolas (Harker *et al.*, 2015). Assim, ao longo do tempo, o uso repetido de rotações curtas deve resultar em quantidades aumentadas de resíduos de canola infestados por patógenos, sendo que uma rotação de quatro anos ou mais permite que grande parte dos resíduos se decomponham antes que a canola seja cultivada novamente e que o rendimento da cultura aumente (Kutcher *et al.*, 2011).

A adoção da rotação de culturas com a introdução de culturas de cobertura melhoraram a sustentabilidade da agricultura tropical através da conservação da qualidade do solo e na eficiência do uso da água (Rodrigues *et al.*, 2022). A adição de resíduos vegetais pode promover, antes da humificação, elevação no pH, por promover complexação de H e Al com compostos do resíduo vegetal, deixando Ca, Mg e K mais livres em solução. Além disso, grande

parte dos ácidos orgânicos tem caráter aniônico, ocasionando competições específicas com nutrientes aniônicos pelos sítios de adsorção e permitindo manter os nutrientes em formas mais disponíveis em solução, a exemplo do P (Pavinato; Rosolem, 2008; Sá *et al.*, 2009).

4.4 USO DE GESSO AGRÍCOLA

O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados que vem sendo cada vez mais utilizado na agricultura brasileira. A sua utilização para a nutrição de plantas é datada desde a antiguidade pelos gregos e romanos, sendo seu primeiro registro como um condicionador inorgânico do solo em 1768, quando foram observados benefícios no crescimento do trevo em experimentos realizados na Suíça. Nos Estados Unidos da América (EUA), no período colonial, o gesso foi introduzido por Benjamin Franklin em campos nativos e, devido às respostas positivas encontradas, ele foi registrado comercialmente com o nome de USG Ben Franklin® “Agricultural Gypsum” e oferecido no mercado de insumos americano (Borkert *et al.*, 1987).

A obtenção do gesso agrícola se dá a partir do processamento dos minérios de rochas fosfáticas que são submetidas ao tratamento químico úmido com ácido sulfúrico e água para a obtenção do ácido fosfórico. Estima-se que no processo de fabricação de fertilizantes fosfatados, as reações químicas para a obtenção do ácido fosfórico ocorrem em uma razão de rendimento de 1 t de P_2O_5 para 5 t de gesso agrícola (Dias, 1992; Pérez-López *et al.*, 2010). O subproduto gesso agrícola constitui-se à base de sulfato de cálcio, com concentrações médias de 15% de S, 22% de Ca, 0,2% de flúor (F) e 0,7% de P_2O_5 (Dias, 1992; Novais *et al.*, 2007; Brasil *et al.*, 2020). Adicionalmente, pode haver à presença de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni) e de outros metais pesados (Co, Na, Al, As, Ti, Sb, Cd) na constituição do gesso agrícola (Ribeiro *et al.*, 1999; Pérez-López *et al.*, 2010).

Considerando as características físicas e o comportamento químico no solo, o gesso agrícola é um sal pouco solúvel em soluções aquosas ($2,5 \text{ g L}^{-1}$), mas que pode atuar sobre a força iônica da solução do solo de maneira que haja contínua liberação do sal para a solução por longos períodos (Ribeiro *et al.*, 1999). Apesar da solubilidade relativamente baixa do gesso agrícola, quando comparado com o calcário, sua solubilidade é cerca de 150 vezes maior. Estas inferências são importantes visto que os valores de solubilidade têm influência marcante na magnitude e na velocidade da reação desses insumos que serão ainda menores quanto mais concentrada em Ca estiver a solução do solo (Borkert *et al.*, 1987).

Em decorrência da baixa mobilidade dos produtos de dissolução do calcário aplicado na superfície e da ausência da incorporação do corretivo, por vezes, a eficiência na correção da acidez do solo no sistema plantio direto apresenta limitações, principalmente em camadas subsuperficiais de solos com cargas variáveis (Caires *et al.*, 2006). A aplicação superficial de calcário não tem um efeito rápido na redução da acidez do subsolo que depende da movimentação de sais orgânicos e/ou inorgânicos através do perfil do solo.

O emprego do gesso agrícola tem sido uma importante estratégia de manejo para a melhoria do subsolo; entretanto, cabe obtemperar que, devido às características inatas de um sal neutro, o gesso não apresenta capacidade de consumir prótons (H^+) e, com isso, não exerce influência na correção da acidez do solo (Alleoni *et al.*, 2005; Caires *et al.*, 2011; Blum *et al.*, 2013; Vicensi *et al.*, 2016). Portanto, a aplicação de gesso agrícola combinada com o uso de calcário em solos ácidos tem se destacado como uma excelente alternativa para melhorar a qualidade química dos solos conduzidos sob sistema plantio direto (Nora *et al.*, 2017; Inagaki *et al.*, 2016).

O gesso agrícola tem despertado interesse por ocasionar melhoria nas condições químicas do subsolo decorrente de aumento nos teores de Ca e de sulfato, e redução na fitotoxicidade de Al, aumento no crescimento e na distribuição de raízes ao longo do perfil do solo, e melhoria na nutrição e produtividade das culturas (Caires *et al.*, 2003, 2011; Dias, 1992; Rampim *et al.*, 2011; Basso *et al.*, 2015; Vicensi *et al.*, 2016; Nora *et al.*, 2017). Quando em contato com o solo, o gesso se solubiliza e se dissocia, formando, na solução do solo, os íons Ca^{2+} , SO_4^{2-} e F^- , além do par iônico neutro $CaSO_4^0$. O aumento no teor de Ca^{2+} também favorece o deslocamento de Al^{3+} , Mg^{2+} e K^+ no complexo de troca catiônica para a solução do solo e, por sua vez, esses cátions poderão formar pares iônicos na solução, como $AlSO_4^+$, AlF^{2+} , $MgSO_4^0$ e KSO_4^- , com alta mobilidade no perfil do solo (Dias, 1992; Novais *et al.*, 2007; Leite *et al.*, 2015; Brasil *et al.*, 2020; Caires *et al.*, 2023; Nora *et al.*, 2017; Rampim *et al.*, 2011; Zambrosi *et al.*, 2007, 2008). Em solos altamente intemperizados, o gesso agrícola também pode ocasionar um discreto aumento no pH em subsuperfície devido a uma reação de troca de ligantes, com o SO_4^{2-} deslocando OH^- na superfície de óxidos de ferro e alumínio, e assim, ocasionando aumento no pH – efeito denominado de "autocalagem" (Reeve; Sumner, 1972).

A aplicação de gesso agrícola, quando associada ao uso de corretivos da acidez e de práticas conservacionistas, também tem desempenhado um papel importante no acúmulo de C orgânico e na melhoria da atividade biológica do solo (Inagaki *et al.*, 2016, 2017). O aumento de Ca e a redução na toxicidade de Al no perfil do solo têm revelado alta correlação com a quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo, observada pela formação e estabilização

das huminas, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos, considerados fatores-chave para melhorar a capacidade produtiva dos Latossolos e, conseqüentemente, a sustentabilidade dos sistemas em regiões tropicais (Carneis Filho *et al.*, 2017; Costa; Crusciol, 2016; Inagaki *et al.*, 2016, 2017).

Para Inagaki *et al.* (2017), a utilização de insumos à base de Ca^{2+} juntamente com o aporte contínuo de resíduos vegetais na superfície do solo revelam-se ferramentas eficientes na agricultura de conservação para solos altamente intemperizados, considerando suas influências positivas no aumento dos reservatórios de C lábeis (C orgânico extraível com água quente e C orgânico oxidável em permanganato), permitindo a manutenção do estoque total de C orgânico no solo. De acordo com esses autores, os estoques de C lábeis foram significativamente aumentados em resposta à melhoria da fertilidade do solo por meio de incrementos no teor de Ca^{2+} e na atividade da enzima β -glicosidase na camada superficial do solo. Além disso, a eficiência de acúmulo de C orgânico no solo com a aplicação de gesso agrícola mostrou uma resposta linear, evidenciando dependência da dose de gesso aplicada na eficiência de acúmulo de C. A maior eficiência de acúmulo de C foi obtida na seguinte ordem de aplicação de gesso, em t ha^{-1} : $9 > 6 > 3$.

Em outro estudo, Inagaki *et al.* (2016) já haviam observado que o sinergismo obtido com uso combinado de calcário e gesso permitiu explorar a correção da acidez do solo e o movimento do Ca^{2+} para as camadas subsuperficiais, influenciando positivamente o crescimento radicular e as entradas de C pela biomassa, especialmente de pools de C lábeis, assim como a atividade enzimática, dependente do aporte de C da biomassa proveniente dos resíduos culturais.

A movimentação de Ca^{2+} trocável e SO_4^{2-} no perfil do solo, provenientes da aplicação de gesso agrícola, pode variar de acordo com a dose de gesso aplicada, os teores de argila e de matéria orgânica no solo, os níveis de acidez e de compactação do solo, e a precipitação pluvial (Caires *et al.*, 2003, 2011; Amaral *et al.*, 2017; Tiecher *et al.*, 2018; Rampim *et al.*, 2011; Nora *et al.*, 2017). Além disso, as alterações no solo proporcionadas por aplicações de calcário e gesso agrícola são complexas e seus efeitos sobre as respostas morfofisiológicas podem variar em cada cultura, sobretudo devido a influência das características intrínsecas como as condições edafoclimáticas durante o desenvolvimento das espécies, a arquitetura do sistema radicular e a sua eficiência na absorção de nutrientes presentes na solução do solo (Caires *et al.*, 2003, 2011, 2023; Costa; Crusciol, 2016; Camilo *et al.*, 2020; Vicensi *et al.*, 2016).

Em um estudo de médio a longo prazo com a aplicação de até 12 t ha^{-1} de gesso agrícola em sistema plantio direto, Blum *et al.* (2013) relataram efeito na carga líquida negativa em camadas subsuperficiais (80 a 200 cm) decorrente da redução no ΔpH . Segundo os autores, as

diferenças provenientes com a aplicação superficial de gesso em termos de ΔpH dão suporte ao importante papel desempenhado pelo SO_4^{2-} nas reações de sorção-precipitação no solo. Nesse sentido, o movimento do sulfato no perfil do solo, assim como sua prevalência em camadas subsuperficiais, associa-se (i) à repulsão do ânion SO_4^{2-} devido aos mais altos teores de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, (ii) à liberação de SO_4^{2-} adsorvido pela aplicação de fosfatos via adubação fosfatada nas camadas superficiais do solo, e (iii) à liberação de SO_4^{2-} adsorvido pelas condições de baixa acidez do solo nas camadas superficiais (Blum *et al.*, 2013).

Em um estudo com aplicação de gesso agrícola realizado em um Latossolo Vermelho sob plantio direto na região Sul do Brasil, Nora *et al.* (2017) verificaram que, embora alguma melhoria na qualidade química da região rizosférica tenha sido observada aos seis meses após a aplicação de gesso, as mudanças mais perceptíveis no aumento da saturação por Ca^{2+} e na redução da saturação por Al^{3+} ocorreram após um período de 30 a 32 meses da aplicação, depois de uma precipitação pluvial acumulada de 5.635 mm.

Amaral *et al.* (2017), avaliando o efeito de doses de gesso agrícola na produtividade de milho de segunda safra e nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa, observaram aumento de 10 e 16 vezes na concentração de SO_4^{2-} e redução de Al trocável nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm de profundidade com a aplicação de gesso. Com a eliminação de impedimentos químicos para o crescimento radicular, as raízes de milho apresentaram maior área superficial para absorção de água e nutrientes, resultando em significativo aumento na produtividade de grãos (Amaral *et al.*, 2017).

A aplicação de gesso agrícola, dependendo da dose, também pode aumentar o teor de P na camada superficial do solo, com reflexos positivos na nutrição de P da soja (Caires *et al.*, 2003, 2011). Porém, o gesso agrícola quando utilizado em doses muito elevadas pode favorecer a movimentação de K^+ e, principalmente, de Mg^{2+} no perfil do solo (Caires *et al.*, 2003; Rampim *et al.*, 2011; Basso *et al.*, 2015). Em solos com níveis elevados de Mg trocável e com baixa relação Ca/Mg nas camadas superficiais, a movimentação de Mg trocável das camadas superficiais para o subsolo após a adição de gesso tem melhorado as condições subsuperficiais, além de ocasionar benefícios na nutrição de Ca e K, e no rendimento de grãos das culturas (Caires *et al.*, 2011). Por consequência do efeito do gesso na redução da disponibilidade de Mg^{2+} nas camadas superficiais do solo, é importante manter as concentrações de Mg trocável acima do nível crítico nas camadas superficiais para garantir adequada nutrição das plantas. Caso os níveis de Mg trocável não sejam adequados, é recomendável realizar a correção da acidez do solo com calcário dolomítico antes do uso de gesso.

Com relação à dinâmica de micronutrientes na relação planta-solo relacionada ao uso de gesso agrícola, são poucos os estudos reportados na literatura. Em um estudo realizado sob plantio direto na região dos Campos Gerais do Paraná, Caires *et al.* (2003) relataram aumento linear no teor de Mn no tecido foliar da soja, ao longo de diferentes safras, com as doses de gesso aplicadas. Em outro estudo, Olsem e Watanab (1979) encontram efeito positivo na adição de sulfato na concentração total de Mn e Zn por meio da formação de pares de íons não carregados, cujo efeito poderia reduzir a competição entre Mn, Zn e Fe, bem como contribuir com a absorção desses nutrientes pelas plantas (Caires *et al.*, 2003; Olsen; Watanabe, 1979).

Apesar dos benefícios da aplicação de gesso no condicionamento do solo e na nutrição de plantas, diversos estudos realizados revelaram respostas diferenciadas do uso de gesso no aumento da produtividade de grãos das culturas (Caires *et al.*, 2023; Bartzen *et al.*, 2020; Fois *et al.*, 2017; Amaral *et al.*, 2017). Dentre eles, Bartzen *et al.* (2020) observaram ausência de resposta da aplicação superficial de gesso agrícola na produtividade de grãos de trigo e soja cultivados em um Latossolo Vermelho eutroférico sob sistema plantio direto consolidado. De acordo com esses autores, o uso de gesso não proporciona benefícios na produtividade das culturas quando ocorrem níveis adequados de Ca e baixos teores de Al trocável no subsolo, associados com ausência de deficiência hídrica durante o ciclo de desenvolvimento das culturas (Bartzen *et al.*, 2020).

Em um estudo de longa duração sob plantio direto, Caires *et al.* (2023) verificaram que o uso de gesso aumentou da eficiência no fornecimento de N, P, Ca e S às plantas de soja. Porém, segundo os autores, apesar do aumento na disponibilidade desses nutrientes, os efeitos positivos da aplicação de gesso na produtividade de grãos de soja foram dependentes do balanço hídrico durante o florescimento da cultura, tendo-se verificado aumentos médios de 15% no rendimento de grãos de soja somente nas safras marcadas por déficit hídrico nesse período.

Em um outro estudo que avaliou a disponibilidade de S no solo e os rendimentos de grãos de soja e milho em segunda safra, Fois *et al.* (2017) constaram acúmulo no teor de S disponível ao longo do perfil do solo após 20 meses da aplicação de gesso. Entretanto, apesar do aumento no teor de S disponível no solo, não houve alterações no rendimento de grãos acumulado das culturas de soja e milho, cujo efeito foi atribuído ao adequado teor de matéria orgânica no solo e à sua suficiência em suprir as necessidades das culturas (Fois *et al.*, 2017).

Vicensi *et al.* (2016), avaliando os efeitos de doses e aplicações fracionadas de gesso em um Latossolo Bruno distrófico, observaram aumentos nas concentrações de Ca^{2+} e SO_4^{2-} e redução no teor de Mg no perfil do solo em resposta às doses de gesso aplicadas. O fracionamento das doses de gesso proporcionou diminuição na migração descendente de SO_4^{2-}

ao longo do perfil do solo, contudo, insuficiente para reduzir a movimentação de Mg^{2+} . Neste estudo, as produtividades de milho trigo e soja não foram alteradas com a aplicação de gesso.

Mesmo em Latossolos de alta fertilidade e baixa acidez sob plantio direto, o uso de gesso agrícola ocasionou acréscimos na produtividade de milho na ordem de 17% (Caires *et al.*, 2004, 2011). Tais efeitos foram decorrentes de aumento na saturação por Ca nas camadas superficiais do solo e nas concentrações de N, K e Ca nas folhas de milho. Alguns estudos têm revelado que espécies gramíneas, como o trigo e o milho, são mais responsivas ao uso de gesso agrícola do que as leguminosas, como a soja, provavelmente devido à maior eficiência das leguminosas na absorção de cátions divalentes e à maior dependência das gramíneas na absorção de nitrato no subsolo (Bartzen *et al.*, 2020; Caires *et al.*, 2016; Pauletti *et al.*, 2014).

É digno de nota que, apesar do conhecimento dos benefícios advindos do uso de gesso na agricultura, os maiores problemas sempre estiveram ligados à estimativa adequada da dose de gesso a ser empregada em diferentes ambientes de solo e sistemas de produção.

As primeiras recomendações de gesso para a melhoria do ambiente radicular no subsolo foram desenvolvidas por Sousa *et al.* (1995) para a região do Cerrado brasileiro. De acordo com a metodologia proposta, o gesso deveria ser usado em solos com saturação de Al maior que 20% e/ou com teores de Ca menores que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em profundidade. O cálculo da necessidade de gesso (NG) deveria ser feito por meio da seguinte equação para culturas anuais (Equação 1) e perenes (Equação 2):

$$NG (\text{kg ha}^{-1}) = 50 \times \text{teor de argila (\%)} \quad (1)$$

$$NG (\text{kg ha}^{-1}) = 75 \times \text{teor de argila (\%)} \quad (2)$$

Recentemente, Caires e Guimarães (2018) propuseram um novo método de cálculo da NG para a produção de grãos no sistema plantio direto, o qual se baseia na elevação da saturação por Ca na CTC efetiva (CTCe) do subsolo (20-40 cm) a 60% quanto esta for inferior a 54%, de acordo com a Equação 3. A validação desse novo método foi realizada pela comparação das doses de gesso recomendadas com aquelas que ocasionaram maior retorno econômico nos estudos com gesso realizados em áreas sob plantio direto no Brasil (Caires; Guimarães, 2018).

$$NG(\text{t ha}^{-1}) = (0,6 \times CTC_e - \text{Teor de Ca em } \text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}) \times 6,4 \quad (3)$$

As recomendações de gesso agrícola têm sido feitas com o objetivo de melhorar as condições químicas no subsolo, visando obter maior crescimento e aprofundamento do sistema radicular, melhor nutrição das plantas e maior produtividade das culturas (Caires; Guimarães, 2018; Michalovicz *et al.*, 2014). É possível que o uso de gesso agrícola em sistemas com maior diversidade de espécies na rotação de culturas sob plantio direto seja ainda mais promissor na melhoria do perfil de enraizamento e na performance das culturas.

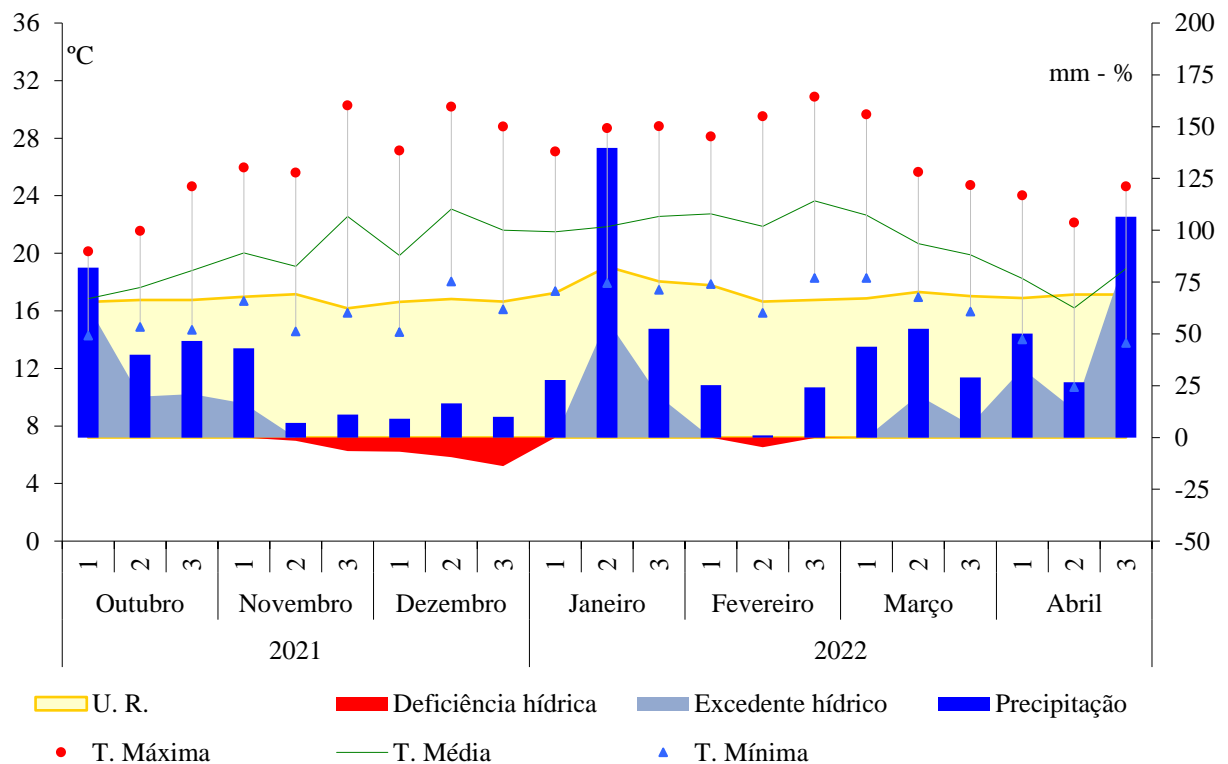
5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 HISTÓRICO DA ÁREA, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O experimento foi realizado na Estação Experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná-IAPAR-EMATER), localizada no município de Ponta Grossa, região Centro-Sul do Estado do Paraná (25°09'38'' de Latitude Sul e 50°09'24'' de Longitude Oeste, com altitude de 835 m). A área experimental tem sido conduzida sob sistema plantio direto desde 1987, com cultivos de aveia preta durante o inverno e, alternadamente, soja e milho durante o verão. O estudo para a avaliação da influência considerando o emprego da sucessão e das diferentes rotações de culturas nessa área foi estabelecido a partir de 2017. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico textura argilosa, situado em relevo suave ondulado (Santos *et al.*, 2018).

O clima da região é do tipo Cfb, subtropical úmido, com temperatura média anual de 18°C e precipitação pluvial média anual de 1550 mm (Nitsche *et al.*, 2019). Os dados climatológicos decendiais e o balanço hídrico climatológico, através do método proposto por Thornthwaite e Mather (1967), para o período de 2021/2022, estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Caracterização climática e balanço hídrico na safra de 2021-2022.

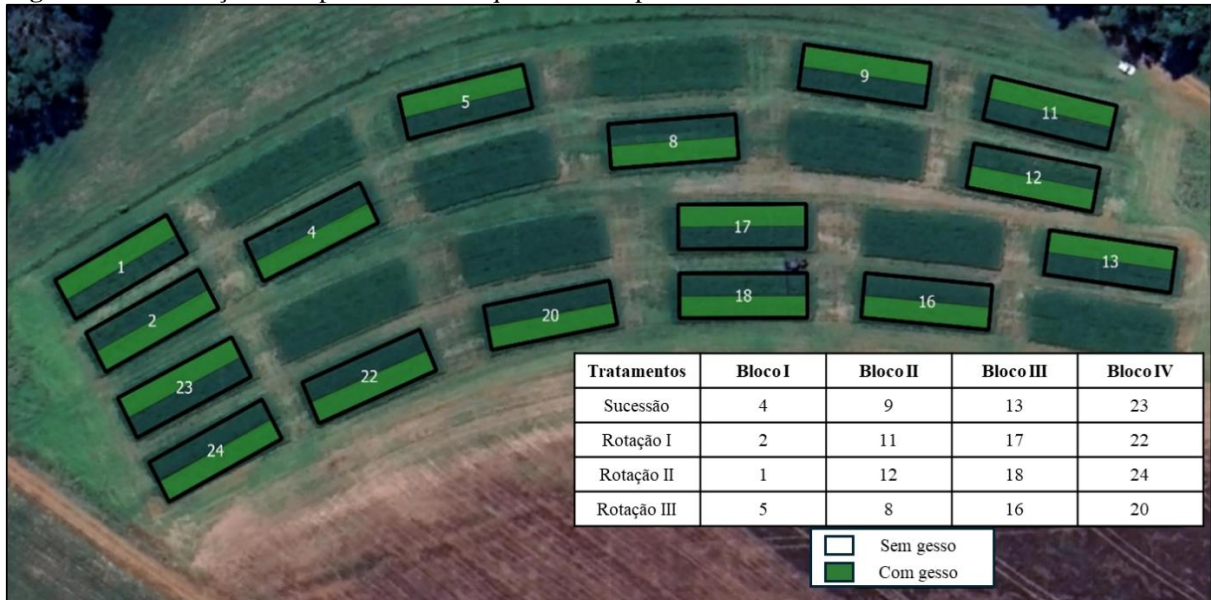


Fonte: Centro Nacional de Pesquisa de Soja. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ponta Grossa: Embrapa. 2023

Nota: Adaptado pelo autor (2023)

O delineamento experimental utilizado foi em blocos completos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições (Figura 1). Nas parcelas (10 × 30 m), foram empregadas os manejos de culturas (sucessão e rotação de culturas) apresentadas na Tabela 1 para o período de 2017–2018 a 2021–2022. Nas subparcelas (5 × 30 m), foram utilizados dois tratamentos, sem e com aplicação superficial de gesso agrícola na dose de 2,85 t ha⁻¹, antes do último cultivo de soja em 2021–2022. A dose de gesso foi definida de acordo com o novo método de recomendação baseado na elevação da saturação por Ca na CTC efetiva do subsolo (20–40 cm) (Caires; Guimarães, 2018).

Figura 2 - Localização do experimento e croqui da área experimental em Ponta Grossa – PR.



Fonte: Google Earth.

Tabela 1 - Tratamentos com sucessão e rotação de culturas no período de 2017/18 a 2021/22.

Tratamentos	Ano 1		Ano 2		Ano 3		Ano 4		Ano 5	
	2017/2018		2018/2019		2019/2020		2020/2021		2021/2022	
Sucessão	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
Rotação I	AP	M	T	S	T	S	AP	M	T	S
Rotação II	Can	M	T	S	Cev	S	Can	M	T	S
Rotação III	AP + Az	M	AP + Az	S	AP + Az	S	Ev	M	T	S

T = Trigo, S = Soja, AP = Aveia preta, Az = Azevém, M = Milho, Can = Canola, Cev = Cevada e Ev = Ervilhaca.

Precedendo a aplicação de gesso agrícola na área experimental, realizou-se a aplicação superficial de 3 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, antes do cultivo de trigo em 2021. Além disso, para definição da dose de gesso adotada no estudo, após o último cultivo de soja em 2019-2020, efetuou-se análise química do solo (Pavan *et al.*, 1992; Cantarella; Prochnow, 2001), cujos resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização química do solo, em diferentes profundidades, após o cultivo da soja em 2019–2020, considerando os tratamentos com sucessão e rotações de culturas empregadas na área experimental.

Tratamentos	pH ⁽¹⁾	C _{org}	P ⁽²⁾	S ⁽³⁾	Cátions trocáveis				m ⁽⁴⁾
					Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	
		g dm ⁻³	--- mg dm ⁻³ ---		----- cmol _c dm ⁻³ -----				%
0-5 cm									
Sucessão	5,0	33,6	31,3	36,4	0,2	5,1	2,8	0,71	3,1
Rotação I	4,9	32,8	23,5	38,0	0,3	4,7	2,5	0,58	4,3
Rotação II	4,8	32,3	23,6	47,8	0,3	3,9	3,1	0,51	3,9
Rotação III	5,2	34,1	19,6	34,2	0,3	4,3	3,5	0,48	2,9
5-10 cm									
Sucessão	4,4	27,1	27,5	72,6	1,0	2,4	1,3	0,32	20,2
Rotação I	4,5	26,4	27,0	66,3	0,8	2,9	1,2	0,29	16,6
Rotação II	4,5	26,2	29,0	81,0	0,4	3,7	1,2	0,28	8,5
Rotação III	4,4	28,0	19,8	45,5	0,7	3,2	1,2	0,25	13,7
10-20 cm									
Sucessão	4,3	23,5	3,5	95,9	1,2	1,9	0,9	0,22	27,8
Rotação I	4,3	22,3	10,4	103,6	1,0	2,1	1,0	0,21	24,6
Rotação II	4,5	24,2	8,2	106,3	0,8	2,8	1,1	0,18	16,5
Rotação III	4,3	24,5	7,4	65,0	1,3	1,8	1,0	0,15	31,1
20-40 cm									
Sucessão	4,5	19,4	7,2	113,6	0,7	1,8	1,0	0,15	19,7
Rotação I	4,5	19,8	2,5	83,6	0,8	1,9	1,1	0,10	21,2
Rotação II	4,5	20,8	3,1	132,9	0,7	1,9	1,2	0,12	18,1
Rotação III	4,5	20,9	12,8	90,9	1,0	1,8	0,8	0,10	26,6

⁽¹⁾pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; ⁽²⁾P extraído com solução de Mehlich-1; ⁽³⁾S-SO₄ extraído com sulfato monocalcico; ⁽⁴⁾m: saturação por alumínio.

Para avaliação da performance da soja considerando o uso da sucessão, das diferentes rotações de culturas e da aplicação de gesso agrícola, utilizou-se o cultivar NS 6209 RR, o qual foi semeado em novembro de 2021, na densidade de 15 plantas por metro e espaçamento de 0,45 m entre as linhas. No dia da semeadura da soja, realizou-se previamente a inoculação líquida das sementes com estirpes de *Bradyrhizobium elkanii* e *B. japonicum*, na dose de 100 mL para cada 50 kg de sementes (5×10^9 UFC mL⁻¹). A implantação da cultura no campo ocorreu com o auxílio de uma semeadora mecanizada modelo Kuhn SDM 2211/13.

As doses e os fertilizantes empregados para cada espécie integrante da sucessão e das rotações de culturas, no período de 2017–2018 a 2021–2022, são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Adubação empregada nas culturas considerando os tratamentos com sucessão e rotações sob sistema plantio direto.

Ano	Tratamentos							
	Sucessão		Rotação I		Rotação II		Rotação III	
	FS	FC	FS	FC	FS	FC	FS	FC
----- kg ha ⁻¹ -----								
2017/18								
Inverno	300 ^B	110 ^A	0	0	240 ^B	110 ^A	0	0
Verão	300 ^c	0	300 ^B	250 ^A	300 ^B	250 ^A	300 ^B	250 ^A
2018/19								
Inverno	270 ^B	100 ^A	270 ^B	100 ^A	270 ^B	100 ^A	0	0
Verão	270 ^B	0	270 ^B	0	270 ^B	0	300 ^B	200 ^A
2019/20								
Inverno	250 ^D	100 ^A	250 ^D	100 ^A	250 ^D	100 ^A	0	0
Verão	270 ^B	0	270 ^B	0	270 ^B	0	270 ^B	0
2020/21								
Inverno	280 ^B	100 ^A	0	0	280 ^B	100 ^E +50 ^A	0	0
Verão	270 ^B	0	300 ^B	250 ^A	300 ^B	250 ^A	300 ^B	250 ^A
2021/22								
Inverno	296 ^D	200 ^A	296 ^D	200 ^A	296 ^D	200 ^A	296 ^D	200 ^A
Verão	300 ^B	0	300 ^B	0	300 ^B	0	300 ^B	0
Totais (kg ha⁻¹)								
N	414		528		571		493	
P ₂ O ₅	836		677		833		530	
K ₂ O	311		226		278		177	

FS: Fertilização no sulco de semeadura; FC: Fertilização em cobertura; A: Ureia; B: Formulação 04-30-10 (N-P₂O₅-K₂O); C: Formulação 02-28-20 (N-P₂O₅-K₂O); D: Formulação 10-30-10 (N-P₂O₅-K₂O); E: Sulfato de amônio.

5.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISES QUÍMICAS DE SOLO

Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, após a colheita da soja em 2022. Em cada subparcela foram retiradas 10 subamostras para constituir uma amostra composta de solo até a profundidade de 20 cm por meio de trado calador, e cinco subamostras para constituir uma amostra composta de solo na profundidade de 20-40 cm por meio de trado holandês. As amostras foram coletadas seguindo um caminhamento em zigue-zague dentro da área útil, com pontos de coleta aleatórios de forma a abranger a maior área possível.

Após coletadas e identificadas, as amostras foram colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura constante de 40 °C e, posteriormente, moídas e passadas em peneira com malha de 2 mm (Figura 3). Nessas amostras, determinaram-se o pH em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, a acidez trocável (Al³⁺) e os teores de Ca e Mg trocáveis por meio de extração com solução de KCl 1mol L⁻¹, os teores de K e P por meio de extração com solução de Mehlich-1 (H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹) e o teor de C orgânico pelo método de

combustão úmida (Walkey-Black), de acordo com os métodos descritos em Pavan *et al.* (1992). Adicionalmente, foram determinados os teores S-SO₄ no solo por meio de extração com solução de fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹ (Cantarella; Prochonow, 2001).

Figura 3 - Coleta e preparo de amostras de solo para análise dos atributos químicos.



5.3 PRODUÇÃO DE BIOMASSA DA PARTE AÉREA DA SOJA

A produção de biomassa seca da parte aérea das plantas de soja foi avaliada por meio da coleta de três subamostras com o auxílio de um gabarito de 0,5 × 0,5 m (0,25 m²) dentro da área útil de cada subparcela, na fase de pleno florescimento. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C até atingirem massa constante e pesadas em balança analítica com precisão de 0,01 g (Figura 4).

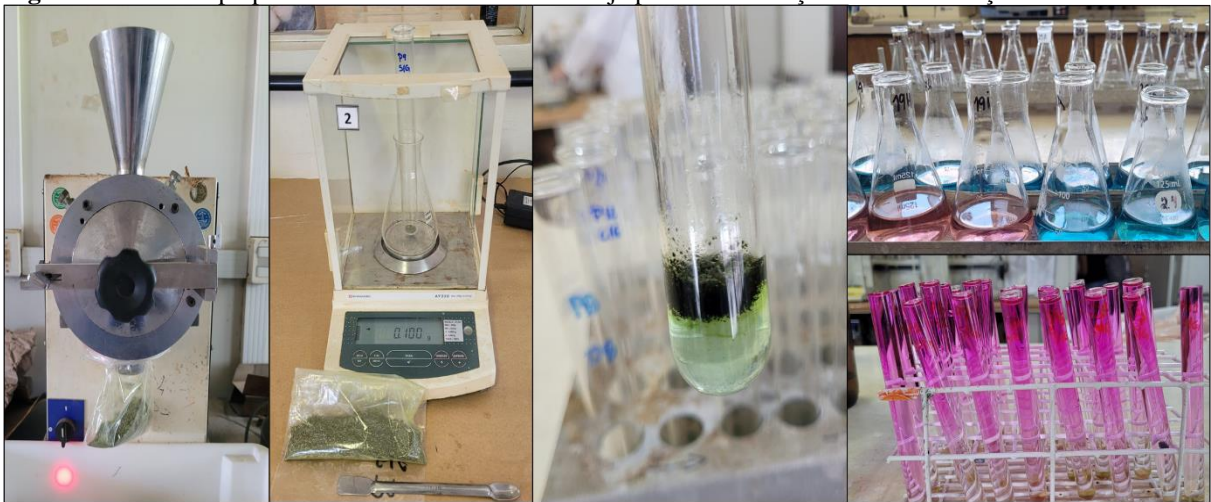
Figura 4 - Coleta e preparo de amostras de plantas para análise da biomassa seca da parte aérea da soja.



5.4 CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES NO TECIDO FOLIAR DA SOJA

Por ocasião do florescimento pleno da soja cultivada em 2021–2022, amostras do terceiro trifólio a partir do ápice foram retiradas em 30 plantas de cada subparcela. As amostras de folhas foram lavadas com água deionizada, colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C até atingir massa constante e moídas (Figura 5). Determinaram-se os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Mn, Fe e Zn, de acordo com os métodos descritos em Malavolta *et al.* (1997).

Figura 5 - Coleta e preparo das amostras de folhas de soja para determinação das concentrações de nutrientes.



5.5 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA

Após a maturidade fisiológica, a soja cultivada em 2021–2022 foi colhida e trilhada para avaliação da produtividade de grãos. Para tanto, utilizaram-se três subamostras constituídas de quatro linhas por 5 m de comprimento (9 m²) em cada subparcela. Após a trilhagem, estimou-se a produtividade corrigindo-se a umidade dos grãos para 130 g kg⁻¹ (Figura 6).

Figura 6 - Coleta e preparo de amostras de grãos para estimativa de produtividade de soja.



5.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos à avaliação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade por meio dos testes de Shapiro Wilk e de Bartlett a 5%, respectivamente. A partir da confirmação dos pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e comparados pelo teste de Tukey a 5%.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO

A análise de variância referente aos atributos de qualidade química do solo revelou ausência de efeito significativo do manejo de culturas (sucessão e rotações de culturas) e do uso de gesso agrícola para o pH, o teor de Mg trocável e a CTC efetiva, em todas as profundidades estudadas (Tabela 4).

Tabela 4 - Resumo da análise de variância para os atributos químicos do solo em diferentes profundidades.

FV	pH	C _{org}	P	S-SO ₄	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	m	CTC _{ef}
0-5 cm										
MC	ns	ns	**	**	*	ns	*	***	***	ns
G	ns	ns	*	***	ns	ns	***	*	*	ns
MC×G	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV MC	4,4	10,9	16,2	16,3	9,1	53,7	7,4	18,2	21,3	12,1
(%) G	3,8	12,5	24,1	22,9	13,1	31,0	6,7	28,0	32,0	12,9
5-10 cm										
MC	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
G	ns	ns	ns	***	ns	ns	*	*	*	ns
MC×G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV MC	5,5	9,6	31,8	32,3	18,2	38,4	16,2	36,7	26,7	18,0
(%) G	3,0	7,0	35,3	14,1	16,6	42,1	15,8	28,0	30,6	10,3
10-20 cm										
MC	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
G	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MC×G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV MC	2,1	4,3	36,0	15,7	14,4	24,8	31,9	33,5	38,9	9,3
(%) G	1,6	4,0	39,6	10,3	12,4	23,9	21,5	27,7	25,1	7,3
20-40 cm										
MC	ns	*	ns	**	ns	ns	***	ns	ns	ns
G	ns	ns	ns	***	ns	ns	***	ns	ns	ns
MC×G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV MC	1,9	5,9	45,0	9,6	17,1	19,1	9,2	32,8	36,1	9,9
(%) G	1,5	5,9	36,9	10,3	11,8	19,9	15,2	25,0	18,4	12,9

FV: fator de variação; CV: coeficiente de variação; MC: manejo de culturas (sucessão e rotações de culturas); G: gesso agrícola; MC×F = interação entre os fatores sucessão/rotação de culturas e gesso agrícola. ns: não significativo; *: significativo a 5%, **: significativo a 1%, e ***: significativo a 0,1%.

Os teores de C orgânico apresentaram estratificação ao longo do perfil do solo, com os maiores teores sendo encontrados na camada superficial de 0-5 cm, entre 33,3 e 36,6 g kg⁻¹, os quais foram decrescendo com o aumento da profundidade (Tabela 5). O manejo de culturas (sucessão e rotações de culturas) influenciou os teores de C orgânico somente nas profundidades de 10-20 e 20-40 cm. Nessas duas profundidades do solo (0-20 e 20-40 cm), a

rotação III, com maior diversificação de espécies, proporcionou maior teor de C orgânico do que a sucessão de culturas. Ainda na profundidade de 20-40 cm, além da rotação III, também se observou maior teor de C orgânico na rotação I quando comparada com a sucessão trigo-soja, todavia, não apresentando diferença estatística da rotação III. O uso de gesso agrícola não ocasionou alterações significativas nos teores de C orgânico nas diferentes profundidades do solo.

Inagaki et al. (2017), avaliando a atividade microbiana e os estoques de C do solo em uma área conduzida sob plantio direto na região dos Campos Gerais do Paraná, observaram influências positivas de curto prazo (1,5 anos) no aumento dos reservatórios de C lábil (C orgânico extraível com água quente e de C orgânico oxidável em permanganato), contudo, sem alterações significativas de C orgânico total do solo, revelando apenas a capacidade de manutenção do estoque total de C quando associado ao aporte regular de biomassa no sistema. Segundo esses autores, os estoques de C lábeis foram dependentes da dose de gesso, dos incrementos nos teores Ca^{2+} no solo e do aumento da atividade biológica do solo (β -glicosidase) na camada superficial do solo.

A superioridade encontrada na rotação III para o teor de C orgânico nas profundidades de 10-20 e 20-40 cm (Tabela 5) pode ser atribuída à maior diversidade de espécies, com culturas de rendimento de grãos associadas a plantas de cobertura com maiores fluxos no aporte de biomassa e liberação de compostos orgânicos derivados de resíduos de raízes e da parte aérea, contribuindo para o aumento dos estoques de C orgânico em camadas superficiais eluviadas ao longo do perfil e permitindo acréscimos de matéria orgânica em maiores profundidades (Sá et al., 2014). Além disso, Canalli *et al.* (2020b) observaram maiores teores de C orgânico na camada superficial e redução em camadas subsuperficiais, decorrente do contínuo aporte de resíduos vegetais. A maior diversificação de espécies com aporte contínuo de resíduos culturais no solo permite incrementos nos estoques de C particulado, responsáveis pela proteção interna de polissacarídeos e compostos aromáticos e pela criação de nichos de proteção entre os agregados (Ferreira *et al.*, 2018). No estudo de Ferreira *et al.* (2018), observou-se que o manejo do solo com maior frequência de soja em relação ao milho proporcionou menor recuperação de C quando comparado à maior frequência de milho na rotação de culturas ao longo de 20 anos, com taxas de recuperação de 58% e 73%, respectivamente.

Tabela 5 - Alterações nos teores de C, P (Mehlich-1) e Al^{3+} trocável do solo, em diferentes profundidades, considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.

Atributos	Prof. (cm)	Gesso	Sucessão	Rotações			Média
				I	II	III	
C-org (g dm ⁻³)	0-5	Sem	34,2	34,8	33,3	37,7	35,0 a
		Com	33,6	33,2	33,3	35,5	33,9 a
		Média	33,9 A	34,0 A	33,3 A	36,6 A	
	5-10	Sem	30,3	31,5	32,9	29,9	31,2 a
		Com	31,4	31,8	32,1	30,2	31,4 a
		Média	30,9 A	31,7 A	32,5 A	30,1 A	
	10-20	Sem	25,4	28,4	25,9	29,1	27,2 a
		Com	25,8	26,2	26,2	27,5	26,4 a
		Média	25,6 B	27,3 AB	26,1 B	28,3 A	
	20-40	Sem	22,5	24,9	23,5	25,4	24,1 a
		Com	23,0	25,4	24,5	25,8	24,7 a
		Média	22,8 B	25,2 A	24,0 AB	25,6 A	
P (Mehlich-1) (g dm ⁻³)	0-5	Sem	32,2	38,8	27,5	23,9	30,6 b
		Com	48,1	34,5	40,8	30,8	38,6 a
		Média	40,2 A	36,7 A	34,2 AB	27,4 B	
	5-10	Sem	27,2	24,0	32,3	28,6	28,0 a
		Com	21,3	24,5	27,3	23,3	24,1 a
		Média	24,3 A	24,3 A	29,8 A	26,0 A	
	10-20	Sem	8,6	6,7	7,2	10,2	8,2 a
		Com	6,3	8,1	9,0	7,1	7,6 a
		Média	7,5 A	7,4 A	8,1 A	8,7 A	
	20-40	Sem	5,0	3,7	3,5	3,0	3,8 a
		Com	4,3	3,0	3,8	3,4	3,6 a
		Média	4,7 A	3,4 A	3,7 A	3,2 A	
Al^{3+} (cmol _c dm ⁻³)	0-5	Sem	0,16	0,18	0,30	0,15	0,20 a
		Com	0,13	0,15	0,21	0,12	0,15 b
		Média	0,15 B	0,16 B	0,25 A	0,13 B	
	5-10	Sem	0,80	0,50	0,59	0,53	0,60 a
		Com	0,45	0,43	0,50	0,51	0,47 b
		Média	0,62 A	0,46 A	0,55 A	0,52 A	
	10-20	Sem	0,70	0,74	0,76	0,87	0,76 a
		Com	0,61	0,56	0,65	0,80	0,65 a
		Média	0,65 A	0,65 A	0,70 A	0,83 A	
	20-40	Sem	0,73	0,71	0,68	0,54	0,67 a
		Com	0,77	0,74	0,75	0,66	0,73 a
		Média	0,75 A	0,72 A	0,71 A	0,60 A	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para sucessão/rotação de culturas e minúsculas para aplicação de gesso agrícola, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

A sucessão trigo-soja e a rotação I proporcionaram maior concentração de P (Mehlich-1) no solo, na camada de 0-5 cm, em relação à rotação III (Tabela 5). Contudo, a existência de diferenças significativas no teor de P no solo quanto às rotações de culturas manteve-se apenas na camada mais superficial do solo. Houve maior entrada de P via adubação na sucessão trigo-soja e nas rotações de culturas I e II, em concordância com a maior frequência de culturas

produtoras de grãos (Tabelas 1 e 3). Não obstante, apesar do menor teor de P no solo, na camada de 0-5 cm, encontrado na rotação III, a maior diversidade de espécies nesta rotação possibilitou a ocorrência de adequado teor de P de acordo com os valores de referência para solos da classe argilosa apresentados por Pauletti e Mota (2017), evidenciando a capacidade das diferentes espécies na ciclagem e disponibilização do nutriente para as culturas em sucessão.

Teles *et al.* (2017), avaliando o uso diferentes plantas de cobertura de inverno sobre a disponibilidade de P no solo, evidenciaram a capacidade de gramíneas, como a aveia e o azevém, na absorção de frações de P moderadamente lábeis presentes nas camadas superficiais, armazenando em suas estruturas aéreas e, posteriormente, incrementando P no solo através da decomposição dos resíduos deixados no solo. Além disso, acúmulos de P lábil e de P não lábil no solo são comumente observados nas camadas próximas à superfície, advindos da aplicação de fontes de fertilizantes fosfatados e da baixa mobilidade desse nutriente no solo (Teles *et al.*, 2017).

A aplicação superficial de gesso agrícola proporcionou incremento significativo no teor de P (Mehlich-1) no solo, na camada de 0-5 cm, e reduziu o teor de Al^{3+} trocável e a saturação por Al^{3+} nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm (Tabela 5 e 6). Contudo, à medida em que houve diversificação dos sistemas produtivos por meio de maior frequência de espécies produtoras de grãos, como a rotação de culturas II, aumentaram os níveis de acidez trocável e saturação por Al^{3+} na camada de 0-5 cm, destacando-se em relação às demais rotações avaliadas no estudo (Tabela 5 e 6).

O efeito benéfico do gesso agrícola na atenuação da toxicidade do Al^{3+} nas camadas de 0-5 e 5-10 cm do solo (Tabela 5 e 6) corroboram com os estudos realizados por Zambrosi *et al.* (2007), os quais atribuíram ao gesso agrícola importantes incrementos nos teores de SO_4^{2-} e de F^- na amenização da toxicidade por Al^{3+} decorrente da formação dos pares iônicos $AlSO_4^+$ e AlF . Segundo esses autores, a presença de Al^{3+} no solo pode afetar a disponibilidade de fosfato na solução do solo, devido a fortes interações com a formação da espécie química $Al-H_xPO_4^x$.

O incremento no teor de P (Mehlich-1) na camada superficial do solo com a aplicação de gesso agrícola (Tabela 5) deve ter sido decorrente da presença de P, como resíduo, na composição do gesso agrícola. Esse resultado corrobora com outros reportados com o uso de gesso agrícola em sistema plantio direto (Caires *et al.*, 2003, 2011, 2023; Zandoná *et al.*, 2015). Considerando a estratificação observada nos teores de P ao longo do perfil do solo, Caires *et al.* (2003) atribuíram a acentuada redução no teor de P a partir da superfície do solo à ausência de revolvimento no sistema plantio direto, à liberação de P durante a decomposição dos resíduos

das plantas deixados sobre a superfície e às aplicações anuais de fertilizantes fosfatados no sulco de semeadura.

Considerando a dinâmica nutricional em cada rotação de culturas pressupõe-se menores saídas de nutrientes do sistema produtivo com a adoção da rotação III comparada com a rotação II, visto que, a grande maioria das plantas de cobertura do solo no inverno foi manejada no estágio de pleno florescimento, caracterizando o máximo acúmulo nutricional em tecidos vegetais e a disponibilização de nutrientes para as culturas sucessoras, de acordo com a decomposição dos resíduos culturais. Não obstante, na rotação II, o maior emprego de culturas produtoras de grãos representaria maiores saídas de nutrientes do solo via exportação pelos grãos, ocasionando aumento na saturação por Al^{3+} (Tabela 6). Outro fator preponderante ao processo de acidificação do solo decorre da utilização de fontes amoniacais no manejo das espécies, como o uso de sulfato de amônio (Tabela 3) que, através da conversão de amônio para nitrato, promove liberação de H^+ com redução no pH e aumento no teor de Al^{3+} trocável, como observado por Rosado *et al.* (2014).

Estudos realizados por Mohammadi e Rokhzadi (2012) revelaram a que a adoção de rotação de culturas mais otimizada, com inclusão de maior diversidade de espécies por meio da adubação verde com leguminosas, antecedendo o cultivo da canola, permitiu fornecer mais N, conseqüentemente, aumentando a absorção de N e a qualidade dos grãos de canola. Esses autores também observaram menores teores de N e S em grãos de canola em sistemas de rotação menos diversificados, a exemplo da sucessão canola-trigo, cujos efeitos foram atribuídos ao fato da menor exploração de nutrientes em maiores profundidades pelas raízes de trigo e canola, levando à absorção e o esgotamento dos nutrientes nas camadas superficiais.

A aplicação de gesso agrícola, após sete meses, ocasionou incrementos significativos no teor de SO_4^{2-} no solo, em todas as camadas amostradas (Tabela 6). Houve uma interação significativa entre o manejo de culturas (sucessão e rotações de culturas) e a aplicação de gesso agrícola para o teor de SO_4-S na camada de 0-5 cm, mostrando que na presença de gesso, a rotação III proporcionou maior teor de SO_4^{2-} do que a sucessão trigo-soja e as rotações I e II. Na camada de 20-40 cm, a sucessão trigo-soja e as rotações I e II proporcionaram maior teor de SO_4^{2-} do que a rotação III, independentemente do uso de gesso.

Tabela 6 - Alterações nos teores de Ca^{2+} e S-SO_4 e saturação por alumínio do solo, em diferentes profundidades, considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.

Atributos	Prof. (cm)	Gesso	Sucessão	Rotações			Média
				I	II	III	
Saturação por Al^{3+} (%)	0-5	Sem	2,1	2,1	3,8	1,6	2,4 a
		Com	1,8	1,8	2,5	1,4	1,9 b
		Média	2,0 B	2,0 B	3,2 A	1,5 B	
	5-10	Sem	13,9	9,3	9,2	8,5	10,2 a
		Com	7,3	7,4	8,2	9,2	8,0 b
		Média	10,6 A	8,4 A	8,7 A	8,9 A	
	10-20	Sem	17,7	16,2	17,3	18,7	17,5 a
		Com	13,8	13,7	14,6	17,6	14,9 a
		Média	15,8 A	15,0 A	16,0 A	18,2 A	
	20-40	Sem	18,9	18,2	18,2	14,8	17,5 a
		Com	20,4	18,6	18,5	16,9	18,6 a
		Média	19,7 A	18,4 A	18,4 A	15,9 A	
S-SO_4 (g dm^{-3})	0-5	Sem	51,5 Ab	45,6 Ab	50,0 Ab	42,5 Ab	47,4
		Com	78,2 Ba	74,2 Ba	84,1 Ba	135,4 Aa	93,0
		Média	64,9	59,9	67,1	89,0	
	5-10	Sem	82,3	86,5	78,4	74,9	80,5 b
		Com	185,5	162,7	171,6	189,2	177,3 a
		Média	133,9 A	124,6 A	125,0 A	132,1 A	
	10-20	Sem	124,3	100,6	110,1	107,6	110,7 b
		Com	217,4	170,3	193,1	190,6	192,9 a
		Média	170,9 A	135,5 A	151,6 A	149,1 A	
	20-40	Sem	206,0	199,3	218,1	141,5	191,2 b
		Com	262,4	254,8	274,0	227,5	254,7 a
		Média	234,2 A	227,1 A	246,1 A	184,5 B	
Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0-5	Sem	5,4	5,6	4,8	5,9	5,4 a
		Com	5,0	5,9	6,2	6,1	5,8 a
		Média	5,2 B	5,8 AB	5,5 AB	6,0 A	
	5-10	Sem	3,4	3,2	3,2	3,3	3,3 a
		Com	3,3	3,2	3,4	3,0	3,2 a
		Média	3,4 A	3,2 A	3,3 A	3,2 A	
	10-20	Sem	2,1	2,3	2,3	2,3	2,3 a
		Com	2,4	2,3	2,4	2,4	2,4 a
		Média	2,3 A	2,3 A	2,4 A	2,4 A	
	20-40	Sem	1,9	2,0	2,0	2,1	2,0 a
		Com	1,8	2,1	2,0	2,2	2,0 a
		Média	1,9 A	2,1 A	2,0 A	2,2 A	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para sucessão/rotação de culturas e minúsculas para aplicação de gesso agrícola, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

O movimento do sulfato ao longo do perfil do solo, assim como a sua prevalência em camadas subsuperficiais é decorrente (i) da repulsão do ânion sulfato devido ao mais alto teor de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, (ii) do aumento no pH nas camadas superficiais pela calagem superficial que libera o sulfato adsorvido, e (iii) da prática da adubação fosfatada nas camadas superficiais do solo, considerando que o fosfato se liga com

maior força do que o sulfato nos mesmos sítios de ligação (Blum *et al.*, 2013). Nora *et al.* (2017), avaliando o efeito temporal de diferentes doses de gesso em sistema plantio direto, relataram um acelerado processo de deslocamento vertical de sulfato na região rizosférica com aumento nos teores entre 85% e 147% na camada de 25-40 cm e entre 284% e 338% na camada de 40-60 cm, aos 56 meses após aplicação de 5 t ha⁻¹ de gesso agrícola.

O teor de Ca²⁺ trocável no solo, na camada superficial de 0-5 cm, revelou incrementos apreciáveis com o emprego da rotação III, o qual foi significativamente maior que o obtido na sucessão trigo-soja (Tabela 6). Franchini *et al.* (2003), avaliando a composição orgânica dos adubos verdes mais importantes utilizados nas rotações de culturas em plantio direto no Sul do Brasil, em diferentes estádios de desenvolvimento, e sua relação com a mobilização de cátions polivalentes em solo com característica ácida, observaram que a partir do florescimento, os extratos de aveia no solo foram excelentes promotores de incrementos no pH e nos teores de Ca, Mg e K trocáveis. Avaliando o crescimento radicular do trigo durante o estágio inicial de desenvolvimento da cultura como indicador biológico no sistema, observou-se que a aplicação de extratos vegetais de adubo verde aumentou o comprimento radicular.

Os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis no solo não foram alterados significativamente com a aplicação de gesso (Tabela 6 e 7), provavelmente, resultado da melhoria da qualidade química do solo proporcionada pela correção da acidez via calagem superficial antecedendo o cultivo trigo, na safra 2021/2022. Além disso, cabe salientar que, apesar de a precipitação pluvial acumulada, de 435 mm ao longo do período experimental, ter sido considerada adequada para o crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (Figura 1), provavelmente, ela não foi suficiente para a dissolução total do gesso agrícola aplicado sobre a superfície do solo.

Em um estudo que avaliou os efeitos da aplicação de gesso agrícola nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico em sistema plantio direto de longa duração na região dos Campos Gerais do Paraná, Caires *et al.* (2011) observaram que a movimentação de Ca²⁺ trocável no perfil do solo variou de acordo com a precipitação pluvial ocorrida. Quanto à redução no teor de Mg²⁺ trocável no solo, considerando a aplicação de gesso, os autores ainda relataram alterações na camada superficial de 0-10 cm, após nove meses, e nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, após 18 e 30 meses da aplicação, mostrando que a movimentação de Mg²⁺ trocável no solo ocorre ao longo do tempo em decorrência da formação do par iônico MgSO₄⁰ com alta mobilidade no perfil do solo.

Tabela 7 - Alterações nos teores de Mg^{2+} e K^+ e nos níveis de pH do solo, em diferentes profundidades, considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.

Atributos	Prof. (cm)	Gesso	Sucessão	Rotações			Média
				I	II	III	
Mg^{2+} ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0-5	Sem	2,0	2,1	2,0	2,5	2,2 a
		Com	1,9	2,1	1,7	2,2	2,0 a
		Média	2,0 A	2,1 A	1,9 A	2,4 A	
	5-10	Sem	1,2	2,0	2,2	2,3	1,9 a
		Com	1,6	1,8	1,8	2,0	1,8 a
		Média	1,4 A	1,9 A	2,0 A	2,2 A	
	10-20	Sem	1,0	1,3	1,0	1,4	1,2 a
		Com	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3 a
		Média	1,2 A	1,3 A	1,1 A	1,4 A	
	20-40	Sem	1,1	1,2	0,9	0,9	1,0 a
		Com	1,0	1,0	1,2	1,0	1,1 a
		Média	1,1 A	1,1 A	1,1 A	1,0 A	
K^+ ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0-5	Sem	0,67	0,71	0,64	0,75	0,69 a
		Com	0,52	0,65	0,58	0,60	0,59 b
		Média	0,59 B	0,68 A	0,61 AB	0,67 A	
	5-10	Sem	0,32	0,37	0,40	0,29	0,35 b
		Com	0,36	0,45	0,41	0,38	0,40 a
		Média	0,34 A	0,41 A	0,41 A	0,34 A	
	10-20	Sem	0,19	0,22	0,31	0,20	0,23 a
		Com	0,26	0,23	0,25	0,19	0,23 a
		Média	0,22 A	0,22 A	0,28 A	0,20 A	
	20-40	Sem	0,15	0,13	0,16	0,09	0,13 b
		Com	0,22	0,18	0,18	0,14	0,18 a
		Média	0,18 A	0,16 B	0,17 AB	0,11 C	
pH	0-5	Sem	5,16	5,18	5,04	5,21	5,15 a
		Com	4,91	4,99	5,18	5,14	5,05 a
		Média	5,03 A	5,08 A	5,11 A	5,18 A	
	5-10	Sem	4,66	4,78	4,70	4,78	4,73 a
		Com	4,69	4,80	4,70	4,65	4,71 a
		Média	4,68 A	4,79 A	4,70 A	4,71 A	
	10-20	Sem	4,40	4,53	4,48	4,49	4,47 a
		Com	4,44	4,44	4,43	4,46	4,44 a
		Média	4,42 A	4,48 A	4,45 A	4,48 A	
	20-40	Sem	4,56	4,59	4,51	4,58	4,56 a
		Com	4,49	4,56	4,54	4,60	4,55 a
		Média	4,53 A	4,58 A	4,53 A	4,59 A	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para sucessão/rotação de culturas e minúsculas para aplicação de gesso agrícola, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

A aplicação de gesso agrícola reduziu o teor de K^+ trocável na camada de 0-5 cm e aumentou o teor do nutriente nas camadas de 5-10 e 20-40 cm do solo (Tabela 7), revelando movimentação de K^+ ao longo do perfil do solo, após sete meses da aplicação. O emprego da rotação III aumentou o teor de K^+ trocável na camada mais superficial do solo de 0-5 cm em relação à sucessão trigo-soja. Em contrapartida, teores mais baixos de K^+ foram encontrados

em profundidade, na camada de 20-40 cm, com o emprego das rotações I e III quando comparados com a sucessão trigo-soja.

A movimentação de K^+ trocável da camada superficial (0-5 cm) para as camadas mais profundas do solo (5-10 e 20-40 cm) em decorrência da aplicação de gesso agrícola (Tabela 7) também foi reportada em outros estudos realizados em solos com alto teor de K^+ na camada superficial (Caires *et al.*, 2011; Rampim *et al.*, 2011). Segundo Zambrosi *et al.* (2008), o sulfato proveniente do gesso presente na solução do solo, além de sua forma iônica livre (SO_4^{2-}), ocorre em complexos formados com outros cátions, como o Mg ($MgSO_4^0$) e o Ca ($CaSO_4^0$) e, em menor proporção, com o K (KSO_4^-). Quando o teor de K^+ trocável na camada superficial do solo é alto, normalmente o complexo KSO_4^- acaba se movimentando um pouco mais para o subsolo, como ocorreu no presente estudo.

Evidentemente, aos incrementos nutricionais na camada superficial de 0-5 cm podem ser atribuídos à alta densidade de plantas no cultivo de gramíneas para adubação verde e às características de plasticidade morfofisiológicas dos sistemas radiculares fasciculados, inatos de grande volume de raízes primárias e secundárias marcadas de zonas pilíferas, com maximização na absorção de nutrientes, como K, Ca e S, em maiores profundidades e disponibilização dos nutrientes para as culturas sucessoras (Tabela 6 e 7) pela decomposição dos resíduos de raízes e da parte aérea. Os resultados obtidos corroboram com os observados por Wolschick *et al.* (2016), os quais verificaram a relevância do uso de aveia preta e de ervilhaca em cultivo solteiro ou consorciado na produção de biomassa seca aérea e de raízes, bem como na ciclagem de nutrientes através dos resíduos do sistema radicular, em quantidades de 1,5 e 2,1 kg ha⁻¹ de Ca, 7,8 e 5,9 kg ha⁻¹ de Mg e 63,3 e 24,1 kg ha⁻¹ de K, respectivamente.

6.2 NUTRIÇÃO DA SOJA

A análise de variância para os teores de nutrientes nas folhas de soja revelou influência do manejo de culturas (sucessão e rotação de culturas) nos teores foliares de N, Mg, S, Cu e Mn, e influência da aplicação de gesso nos teores foliares de P, Ca, Mg, S e Zn (Tabela 8). Os teores de nutrientes no tecido foliar da soja não foram influenciados pela interação manejo de culturas × gesso agrícola.

Tabela 8 - Resumo da análise de variância para teores os teores de nutrientes nas folhas de soja.

FV	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
MC	*	ns	ns	ns	**	*	*	ns	*	ns
G	ns	***	ns	***	***	*	ns	ns	ns	*
MC×G	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV MC	19,2	9,0	6,4	7,2	4,1	11,2	38,7	9,7	10,9	8,9
(%) G	27,31	9,0	4,4	5,3	6,0	14,4	34,1	5,4	15,5	7,1

FV: fator de variação; CV: coeficiente de variação; MC: manejo de culturas (sucessão e rotações de culturas); G: gesso agrícola; MC×G = interação entre os fatores sucessão/rotação de culturas e gesso agrícola. ns: não significativo; *: significativo a 5% e ***: significativo a 0,1%.

A ausência de efeito da aplicação de gesso agrícola no teor de K nas folhas de soja corrobora com os resultados encontrados por Caires *et al.* (2023) em uma sucessão trigo-soja sob plantio direto. Possivelmente, a ausência de resposta foi decorrente do adequado suprimento nutricional proporcionado pelo manejo da adubação nas diferentes espécies que compõem a sucessão e as rotações de culturas (Tabelas 1 e 3) e, ainda, das características morfofisiológicas dos diferentes sistemas radiculares que possibilitaram a ciclagem nutrientes das camadas subsuperficiais, proporcionando adequada disponibilidade de nutrientes no solo e adequada nutrição potássica da soja (Pauletti; Motta, 2017).

A aplicação superficial de gesso aumentou significativamente as concentrações de P, Ca, S e Zn nas folhas de soja (Tabela 9). O uso de gesso também proporcionou redução na concentração de Mg no tecido foliar da soja. Destaca-se que o gesso agrícola é fonte de Ca e S, e apresenta P como resíduo na sua composição (Tabela 5 e 6). Os resultados encontrados com a aplicação de gesso na nutrição da soja foram similares a outros estudos realizados em sistema plantio direto, em que o emprego de gesso proporcionou aumento nos teores foliares de Ca e S com a aplicação de até 6 t ha⁻¹ (Caires *et al.*, 2023) e no teor foliar de P com a adição de até 9 t ha⁻¹ (Caires *et al.*, 2003). A redução de Mg no tecido foliar da soja com a aplicação de gesso também foi encontrada em outros estudos em decorrência da movimentação do par iônico MgSO₄⁰ das camadas superficiais para o subsolo (Caires *et al.*, 2003; Zambrosi *et al.*, 2007).

O incremento no teor foliar de Zn com a aplicação de gesso pode ter sido consequência de aumento da troca iônica entre Ca²⁺ e Zn²⁺ em consequência do incremento de Ca²⁺ na solução do solo com a adição de gesso. Efeito semelhante foi observado por Caires *et al.* (2003) no teor de Mn nas folhas de soja após aplicação de gesso em sistema plantio direto.

Quanto às rotações de culturas, a rotação III, com a inclusão de diferentes espécies de gramíneas e leguminosas como culturas de cobertura de inverno, intercaladas em diferentes anos com a soja e milho no verão, proporcionou maiores teores de N, Mg e S nas folhas de soja quando comparada com a rotação I (Tabela 9), a qual teve menor diversificação de espécies de

cobertura. Além disso, em comparação com a rotação III, houve maior teor foliar de Cu com o emprego da rotação I e maior teor foliar de Mn com o emprego da sucessão trigo-soja.

Tabela 9 - Teores de nutrientes nas folhas de soja cultivada em 2021–2022 considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.

Gesso	Sucessão	Rotação de culturas			Média
		I	II	III	
N-foliar (g kg ⁻¹)					
Sem	43,7	37,1	42,0	43,9	41,7 a
Com	44,4	40,1	41,2	42,6	42,1 a
Média	44,1 A	38,6 B	41,6 AB	43,3 A	
P-foliar (g kg ⁻¹)					
Sem	5,1	4,8	5,1	4,6	4,9 b
Com	5,8	5,6	6,0	5,7	5,8 a
Média	5,5 A	5,2 A	5,6 A	5,2 A	
K-foliar (g kg ⁻¹)					
Sem	31,4	32,9	32,6	31,0	32,0 a
Com	31,3	34,0	31,3	30,0	31,7 a
Média	31,4 A	33,5 A	32,0 A	30,5 A	
Ca-foliar (g kg ⁻¹)					
Sem	8,5	8,3	8,5	8,7	8,5 b
Com	9,4	9,3	10,4	9,3	9,6 a
Média	9,0 A	8,8 A	9,5 A	9,0 A	
Mg-foliar (g kg ⁻¹)					
Sem	3,5	3,2	3,4	3,5	3,4 a
Com	2,8	2,6	2,9	2,9	2,8 b
Média	3,2 A	2,9 B	3,2 A	3,2 A	
S-foliar (g kg ⁻¹)					
Sem	2,6	2,2	2,2	2,8	2,5 b
Com	2,6	2,8	2,8	3,2	2,9 a
Média	2,6 AB	2,5 B	2,5 B	3,0 A	
Cu-foliar (mg kg ⁻¹)					
Sem	10,2	11,8	10,8	7,7	10,1 a
Com	10,5	10,4	9,9	6,4	9,3 a
Média	10,4 AB	11,1 A	10,4 AB	7,1 B	
Mn-foliar (g kg ⁻¹)					
Sem	60,8	59,8	63,1	53,3	59,3 a
Com	69,2	69,0	64,3	55,5	64,5 a
Média	65,0 A	64,4 AB	63,7 AB	54,4 B	
Fe-foliar (mg kg ⁻¹)					
Sem	93,0	92,5	93,6	93,1	93,1 a
Com	95,9	91,9	96,7	85,1	92,4 a
Média	94,5 A	92,2 A	95,2 A	89,1 A	
Zn-foliar (mg kg ⁻¹)					
Sem	29,2	29,7	31,7	31,2	30,5 b
Com	33,5	31,7	33,2	33,0	32,9 a
Média	31,4 A	30,7 A	32,5 A	32,1 A	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para sucessão/rotação de culturas e minúsculas para aplicação de gesso agrícola, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

Os maiores teores de N e S, assim como os menores teores de Cu e Mn, nas folhas de soja, com o emprego da rotação III no manejo conservacionista do solo, provavelmente relacionam-se com a elevada capacidade de aporte de biomassa das gramíneas, com produção de resíduos vegetais de alta relação C/N com maiores tempos de meia-vida, levando à liberação lenta e gradual dos nutrientes para a cultura sucessora. Contudo, a inserção da leguminosa ervilhaca peluda nesta rotação pode ter favorecido a decomposição dos resíduos vegetais pelo suprimento de N, potencializando a liberação de N e S no solo (Canalli *et al.*, 2020a), e a disponibilização gradual de micronutrientes para a solução do solo. Os resultados corroboram com Caires *et al.* (2006), os quais relataram que a manutenção de resíduos de aveia preta sobre a superfície do solo pode favorecer a nutrição de N e P em plantas de soja cultivadas em sucessão, contudo, observaram também redução de Mn no tecido foliar da soja.

Em outro estudo, Souza *et al.* (2010) atribuíram às alterações no pH, particularmente na rizosfera de plantas fixadoras de N₂ um papel fundamental na absorção de alguns micronutrientes. Segundo esses autores, a intensificação na absorção de Mn ocorre durante o início da floração da cultura da soja, com maiores acúmulos na parte aérea e no sistema radicular coincidindo com a queda constante no pH do solo próximo ao sistema radicular. Contudo, a absorção de Cu pelas plantas revelou baixa correlação com o pH do solo, havendo predominância de Cu ligado à matéria orgânica (quelatos) na fase sólida e na solução do solo. Assim, o acúmulo de Cu na planta é favorecido por sua afinidade com o N do grupo amino, com os compostos nitrogenados solúveis atuando como carregadores de Cu no xilema e no floema.

6.3 PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA DA PARTE AÉREA E DE GRÃOS DE SOJA

A análise de variância não revelou efeitos significativos dos tratamentos com sucessão/rotação de culturas e uso de gesso na biomassa seca da parte aérea da soja (Tabela 10). A produtividade de grãos de soja foi influenciada significativamente somente pelo manejo de culturas (sucessão e rotações de culturas).

Tabela 10 - Resumo da análise de variância para as produtividades de biomassa da parte aérea e de grãos de soja.

FV		Biomassa seca da parte aérea	Produtividade de grãos
MC		ns	*
G		ns	ns
MC×G		ns	ns
CV (%)	MC	7,4	14,2
	G	7,2	16,7

FV: fator de variação; CV: coeficiente de variação; MC: manejo de culturas (sucessão e rotações de culturas); G: gesso agrícola; MC×G = interação entre os fatores sucessão/rotação de culturas e gesso agrícola. ns: não significativo e *: significativo a 5%.

A produtividade de biomassa seca da parte aérea da cultura da soja deve ter sido mais influenciada pelo potencial genético da espécie, visto que suas características morfofisiológicas são selecionadas geneticamente visando maiores incrementos no rendimento de grãos. Estudos realizados por Bender *et al.* (2013) destacaram melhoria no índice de colheita e uma mudança fundamental no uso de germoplasma na cultura da soja, observando maiores partições da biomassa aérea na maturidade distribuídas nas estruturas reprodutivas das vagens e dos grãos. Dessa maneira, as altas proporções de estruturas vegetativas na planta representam maior custo energético de manutenção e menores proporções de fotoassimilados destinados ao acúmulo de grãos.

Apesar de os benefícios no condicionamento do solo e na nutrição das plantas, a produtividade de grãos de soja não foi influenciada significativamente pelo uso de gesso. Resultados semelhantes, com ausência de resposta do rendimento da soja ao uso de gesso, foram também obtidos em outros estudos (Caires *et al.*, 2023; Bartzen *et al.*, 2020; Amaral *et al.*, 2017). De acordo com Bartzen *et al.* (2020), o uso de gesso possivelmente não expressa o seu potencial de efetividade em solos com níveis adequados de Ca^{2+} e baixos teores de Al^{3+} trocável no subsolo, associados à ausência de deficiência hídrica durante o desenvolvimento da cultura. Caires *et al.* (2023) verificaram que o efeito positivo da aplicação de gesso na produtividade de grãos de soja foi dependente do balanço hídrico durante o período de florescimento da cultura, tendo-se obtido incrementos médios de 15% no rendimento de grãos de soja em safras marcadas por déficit hídrico.

No presente estudo, apesar de terem ocorrido períodos de déficit hídrico nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura da soja (38,4 mm), o déficit hídrico no estágio de florescimento foi muito baixo (5,1 mm) (Figura 1) e, certamente, insuficiente para ocasionar resposta significativa na produtividade de soja com o uso de gesso (Tabela 11). Além disso, o teor adequado de Ca^{2+} trocável ao longo do perfil do solo e os níveis não muito elevados de Al^{3+} trocável e saturação de Al^{3+} no subsolo (Tabela 2) evidenciam a necessidade da aplicação

de fosfogesso em doses baixas para a melhoria dos atributos químicos do solo e que, possivelmente, **elucidam a** ausência de resposta significativa na produtividade de grãos de soja, como proposto por Caires e Guimarães (2018).

Tabela 11 - Produtividade de biomassa seca da parte aérea e de grãos de soja, cultivada em 2021–2022, considerando os tratamentos com a sucessão trigo-soja, as rotações de culturas e a aplicação superficial de gesso agrícola em sistema plantio direto.

Gesso	Sucessão	Rotações de culturas			Média
		I	II	III	
Biomassa seca da parte aérea da soja (kg ha ⁻¹)					
Sem	6027	5960	5846	5818	5913 a
Com	6252	5461	6234	5968	5979 a
Média	6140 A	5710 A	6040 A	5893 A	
Produtividade de grãos de soja (kg ha ⁻¹)					
Sem	3744	3642	3364	3305	3514 a
Com	3720	3431	2990	3565	3426 a
Média	3732 A	3537 AB	3177 B	3435 AB	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas para sucessão/rotação de culturas e minúsculas para aplicação de gesso agrícola, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

A estimulação das plantas cultivadas, frente a condições adversas, pode ser favorecida pela presença de ácidos húmicos provenientes de resíduos vegetais, atuando como centro regulatório chave de hormônios vegetais, modificadores de receptores de plantas e da atividade de fosfatases e da homeostase celular, como relatado por Souza *et al.* (2022). Outros estudos revelaram influência de ácidos húmicos na expressão da atividade da enzima H⁺-ATPase, com funções importantes na captação de íons e na formação de um gradiente eletroquímico, através de acúmulos de solutos nas raízes capazes de diminuir o potencial osmótico e o potencial hídrico radicular, essenciais no mecanismo de crescimento em condições ambientais de acidez e de baixa disponibilidade hídrica no solo (Castro *et al.*, 2021, 2022; Nunes *et al.*, 2019; Canellas *et al.*, 2002).

A minimização dos efeitos da deficiência hídrica em plantas de soja (Figura 1) também poderia ter decorrido pela presença dos teores adequados de nutrientes ao longo do perfil do solo, verificados no início da instalação do experimento (Tabela 3), permitindo a exploração das raízes em profundidade e a manutenção das atividades metabólicas das plantas. Em estudos conduzidos por Santos *et al.* (2021) e Martineau *et al.* (2017), a fertilização do solo com K pode afetar mecanismos fisiológicos adaptativos nas plantas cultivadas em ambientes sob estresse abiótico de seca, relacionadas ao aumento da eficiência de absorção pelo sistema radicular e da concentração do nutriente em tecidos foliares. Segundo esses autores, a alta concentração de K nas folhas contribui para diminuir o potencial osmótico e a ativação do comportamento

isoídrico, relativo à manutenção da atividade dos estômatos no processo de assimilação de CO₂, aumentando a eficiência do uso da água nas folhas através de menores taxas de transpiração e redução na produção de espécies reativas de oxigênio nos cloroplastos.

A produtividade de grãos de soja foi 17,5% maior com o emprego da sucessão trigo-soja comparada com a rotação II, com médias de 3732 kg ha⁻¹ e 3177 kg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 11). No entanto, as produtividades de grãos de soja foram estatisticamente semelhantes entre a sucessão trigo-soja e as rotações I e III. Segundo Calonego e Rosolem (2010), a adoção de gramíneas na rotação de culturas apresenta efeito gradual na melhoria da estrutura do solo, promovendo maior crescimento radicular da soja em profundidade, como consequência da presença de bioporos e da diminuição da resistência à penetração. Além do efeito físico, o aumento de bioporos promove um ambiente favorável para o crescimento radicular na presença de períodos de baixa precipitação pluvial, através de maior alongamento radicular da soja sob a linha de semeadura e maior densidade de comprimento de raízes nas entrelinhas, na medida em que ocorrem maiores teores de matéria orgânica para reserva de nutrientes e redução na fitotoxicidade de Al³⁺ no solo.

Considerando a performance da cultura da soja, a sucessão trigo-soja garantiu adequada nutrição das plantas (Tabela 9) e maior produtividade de grãos de soja comparada com a rotação II (Tabela 11), relacionando-se com menores teores de acidez trocável e de saturação por Al³⁺ encontrados na sucessão trigo-soja (Tabela 5 e 6). O emprego do trigo antecedendo a soja caracteriza-se uma opção importante para o manejo de rotação, visto o aporte de fitomassa com alta relação C/N, permitindo disponibilizar nutrientes ao longo de todo ciclo da cultura da soja (Canalli *et al.*, 2020a; Kubo *et al.*, 2007). Portanto, a sucessão trigo-soja foi uma boa opção porque maximizou a produtividade de grãos de soja.

A igualdade estatística entre a sucessão trigo-soja e a rotação III quanto à produtividade de grãos de soja (Tabela 11) foi devida à melhoria da qualidade química do solo obtida com a rotação III, por meio de maior ciclagem de nutrientes, como Ca, Mg, K e S, acúmulo de C em profundidade e redução dos efeitos tóxicos do Al³⁺ (Tabelas 5, 6 e 7), proporcionados pela maior diversidade de espécies de plantas de cobertura do solo no inverno e pela alternância de milho e soja no verão (Tabela 1). Os resultados corroboram com Sá *et al.* (2014) que relataram uma forte relação entre os estoques de C orgânico e o rendimento de grãos de trigo e soja, sendo o incremento de 1 t C ha⁻¹ na profundidade de 0–20 cm responsável por aumentos de 11 e 26 kg ha⁻¹ de grãos de soja e trigo, respectivamente.

Em estudos conduzidos por Molin (2008) durante um período de 15 anos, com intuito de avaliar o rendimento de grãos em diferentes subsistemas de produção na região dos Campos

Gerais do Paraná, observou-se que no subsistema composto exclusivamente pela sucessão trigo-soja, a obtenção de rendimento médio de 3327 kg ha⁻¹ de soja. Contudo, promovendo uma redução em cerca da metade do número de safras de soja e trigo ao longo do período experimental, acompanhada de maior diversificação de espécies com a inclusão de culturas comerciais e de cobertura do solo, a exemplo das sucessões milho/ervilhaca, aveia/milho e azevém/milho, houve aumentos nas produtividades de soja, com rendimentos de grãos de 3609, 3573 e 3412 kg ha⁻¹, respectivamente, os quais foram próximos dos obtidos com as rotações de culturas utilizadas no presente estudo (Tabela 11).

7 CONCLUSÕES

A maior diversificação de espécies utilizada na rotação III comparada com a sucessão trigo-soja proporcionou aumentos significativos no teor de C orgânico nas camadas de solo de 10–20 e 20–40 cm e nos teores de Ca^{2+} , K^+ e SO_4^{2-} na camada superficial do solo (0–5 cm). Além disso, a inclusão de sistemas mais diversificados de rotação de culturas, com o cultivo de espécies de cobertura de aveia preta, azevém e ervilhaca, intercaladas com culturas comerciais de soja e milho, proporcionou melhoria nos teores de N, Mg e S nas folhas de soja, demonstrando ser uma excelente alternativa para o sistema de produção de grãos.

A sucessão trigo-soja garantiu adequada nutrição das plantas e proporcionou maior produtividade de grãos de soja em relação à rotação II (com canola-milho), sem apresentar diferenças significativas em relação a sistemas mais diversificados.

O uso de gesso agrícola aumentou o teor de P na camada superficial (0–5 cm) e o teor de SO_4^{2-} em todo o perfil do solo, e reduziu o teor e a saturação de Al^{3+} nas camadas de 0–5 e 5–10 cm. A aplicação superficial de gesso aumentou os teores de Ca, S, P e Zn nas folhas de soja, mas não ocasionou alteração significativa na produtividade de grãos de soja.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. W. de; SANTOS, J. R.; MOURA FILHO, G.; REIS, L. S. Plantas de cobertura e adubação nitrogenada na produção de milho em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 721–726, 2013.
- ALLEONI, L. R. F.; IGLESIAS, C. S. M.; MELLO, S. de C.; CAMARGO, O. A. de; CASAGRANDE, J. C.; LAVORENTI, N. A. Atributos do solo relacionados à adsorção de cádmio e cobre em solos tropicais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 4, p. 729–737, 2005.
- ALMEIDA, D. DE O.; BAYER, C.; ALMEIDA, H. C. Fauna e atributos microbiológicos de um Argissolo sob sistemas de cobertura no Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1140–1147, 2016.
- ALMEIDA, J. A. de; RIBEIRO, C. F.; OLIVEIRA, M. V. R. de; SEQUINATTO, L. Mineralogia da argila e propriedades químicas de solos do Planalto Norte Catarinense. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 2, p. 267–277, 2018.
- ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; OLIVEIRA, I. R. de; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A. de; COELHO, A. M.; RESENDE, A. V.; VIANA, M. C. M.; COSTA, P. M.; BARBOSA, F. A.; LOPES, L. S. **Sistema de Integração Lavoura-Pecuária como estratégia de produção sustentável em região com riscos climáticos**. 2. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. 23 p. (Embrapa. Comunicado Técnico, 237).
- AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B-H. C.; VEIGA, M. Potential of Carbon Accumulation in No-Till Soils with Intensive Use and Cover Crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, v. 35, n. 4, p. 1599–1607, 2006.
- AMARAL, L. A., ASCARI, J. P., DUARTE, W. M., MENDES, I. R. N., SANTOS, E. S., & JULIO, O. L. L. Efeito de doses de gesso agrícola na cultura do milho e alterações químicas no solo. **Agrarian**, v. 10, n. 35, p. 31–41, 2017.
- ANGELETTI, M. da P.; SOUZA, J. L. de; COSTA, H.; FAVARATO, L. F.; MUZZI, E. de M.; MUNIZ, E. S.; LAURETT, L.; ZANUNCIO JUNIOR, J. S.; GUARÇONI, A. **Espécies vegetais para cobertura do solo: guia ilustrado**. Vitória, ES: Incaper, 2018. 76 p. (Incaper. Circular Técnica, 07-I).
- BARTZ, M. L. C.; COSTA, A. C. S. da; SOUZA JUNIOR, I. G. de; BROWN, G. G. Micronutrientes e óxidos de ferro em coprólitos de minhocas produzidos em um Latossolo Vermelho distroférico (Oxisol) sob diferentes sistemas de manejo. **ACTA ZOOLOGICA MEXICANA (N.S.)**, v. 26, p. 281–294, 2010.
- BARTZEN, B. T.; OLIVEIRA, P. S. R. de; SEIDEL, G. O.; HOELSCHER, G. L.; PIANO, J. T. Resposta do trigo e soja após a aplicação de doses de gesso agrícola. **Acta Iguazu**, v. 9, n. 3, p. 113–123, 2020.

BASSO, C. J.; SOMAVILLA, L.; SILVA, R. F. da; SANTI, A. L. Intervenção mecânica e gesso agrícola para mitigar o gradiente vertical de cátions sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 456–463, 2015.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 687–694, 1999.

BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern, Transgenic Insect-Protected Maize Hybrids. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 161–170, 2013.

BEVILAQUA, G. A. P. **Manejo de Sistemas de Produção de Centeio Visando a Produção de Forragem e de Sementes para a Agricultura Familiar**. 1. ed. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2010.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. dos; MANZATTO, C. V.; BOGNOLA, I. FASOLO, P. J.; CARVALHO, A. P. de; POTTER, R. O.; CURCIO, G. R.; AGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S. de; CHAFFIN, C. E.; CARVALHO JUNIOR, W. de; CARDOSO, A.; HOCHMÜLLER, D. P.; RÜEN, J. O. I. **Mapa de Solos do Estado do Paraná**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.

BLUM, S. C.; CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R. F. Lime and phosphogypsum application and sulfate retention in subtropical soils under no-till system. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, n. 2, p. 279–300, 2013.

BORKERT, C. M.; PAVAN, M. A.; LANTMANN, Á. F. **Considerações sobre o uso de gesso na agricultura**. Londrina (PR): Embrapa, 1987. 5 p. (Embrapa. Comunicado Técnico, 40).

BORTOLUZZI, E. C.; SANTOS, D. R. dos.; PETRY, C.; KAMINSKI, J. Contribuição de constituintes de solo à capacidade de troca de cátions obtida por diferentes métodos de extração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 507–515, 2009.

BORTOLUZZI, E. C.; PÉREZ, C. A. S.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, v. 104, p. 196–204, 2015.

BORTOLUZZI, E. C.; PERNES, M.; TESSIER, D. Interstratificado caulinita-esmectita em um argissolo desenvolvido a partir de rocha sedimentar do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1291–1300, 2007.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686 p.

BRASIL, E. C.; LIMA, E. DO V.; CRAVO, M. DA S. Uso de gesso na agricultura. Em: **Recomendações de Calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 133–146.

- BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M. de; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. de F.; INAGAKI, T. M.; FERREIRA, A. de O. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1007–1014, 2012.
- BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. M. de; LAL, R.; TIVET, F.; FERREIRA, A. de O.; FRANCHINI, J. C.; SCHIMIGUEL, R.; HARTMAN, D. da C.; SANTOS, J. Z. dos. Can highly weathered soils under conservation agriculture be C saturated? **CATENA**, v. 147, p. 638–649, 2016.
- CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1011–1022, 2002.
- CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 275–286, 2003.
- CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 125–136, 2004.
- CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 87–98, 2006.
- CAIRES, E. F.; MASCHIETTO, E. H. G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. W. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 209–216, 2011.
- CAIRES, E. F.; DUART, V. M.; RODRIGUES, G. L. A.; BINI, A. R. Crop nutrition and grain yield as affected by phosphorus fertilization and continued use of phosphogypsum in an Oxisol under no-till management. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, n. 12, p. 2370–2385, 2023.
- CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A Novel Phosphogypsum Application Recommendation Method under Continuous No-Till Management in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1987–1995, 2018.
- CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnesium: A Forgotten Element in Crop Production. **Better Crops**, v. 94, n. 2, 2010.
- CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S. de; GUIMARÃES, M. de F.; SANTOS, D. R. dos. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, 2013.
- CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 242–249, 2010.

CAMILO, E. L.; MÜLLER, M. M. L.; RAMPIM, L.; CAMILO, M. L.; GRAFFUNDER, W. R.; KULIK, J. L.; POTT, C. A. Acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura em cultivo solteiro, consórcio e policultivo na Região Sul do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e779997870–e779997870, 2020.

CANALLI, L. B. dos S.; SANTOS, J. B. dos; SILVA, A. A. e; MUCHINSKI, A.; FELICIANO, E.; PENTEADO, D. Residues Decomposition in Crop Rotations under No-till System. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 63, p. e20190609, 2020a.

CANALLI, L. B. dos S.; SANTOS, J. B. dos; BENASSI, D. A.; FRANCISCO, A. L. O. de; BENASSI, C.; AGUIAR, A. N. de; CORDEIRO, E.; MENDES, R. S. Soil Carbon and Structural Quality in Crop Rotations under No-tillage System. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 63, p. e20190603, 2020b.

CANALLI, L. B. DOS S.; CALEGARI, A. Adubação verde ou plantas de cobertura. Em: **Manual de manejo e conservação do solo e da água para o estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba - PR: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – NEPAR-SBCS, 2019. p. 325.

CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; OKOROKOVA-FAÇANHA, A. L.; FAÇANHA, A. R. Humic Acids Isolated from Earthworm Compost Enhance Root Elongation, Lateral Root Emergence, and Plasma Membrane H⁺-ATPase Activity in Maize Roots. **Plant Physiology**, v. 130, n. 4, p. 1951–1957, 2002.

CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L. I. Determinação de sulfato em solos. RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. Cap 14, p. 225-230.

CARDOSO, D. P.; NICOLE, L. R.; OLIOSI, G.; PIRES, F. R. Plantio de aveia-preta na região de São Mateus no estado do Espírito Santo, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 4, p. 41, 2015.

CARMEIS FILHO, A. C. A.; PENN, C. J.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 241, p. 11–23, 2017.

CARMO, D. L. DO; LIMA, L. B. DE; SILVA, C. A. Soil Fertility and Electrical Conductivity Affected by Organic Waste Rates and Nutrient Inputs. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. e0150152, 2016.

CARVALHO, A. M.; COESER, T. R.; REIN; T. A.; DANTAS; R. de A.; SILVA, R. R.; SOUZA, K. W. Manejo de plantas de cobertura na floração e na maturação fisiológica e seu efeito na produtividade do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 551–561, 2015.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R. de; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 277–290, 2010.

CASSOL, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; AMADORI, C.; HASKEL, M. K.; FREITAS, L. A. de; TOMAZONI, A. R. Residual biomass quality index: a tool for conservation agriculture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0220150, 2023.

CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M. DA; NETO, J. F. Ecofisiologia da Aveia Branca. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 11, n. 3, p. 1–15, 2012.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, p. 1161–1164, 2003.

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

COSTA, M. L. da; CRUZ, G. da S.; ALMEIDA, H. D. F. de; POELLMANN, H. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: Evidence of genetic relationships. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 146, p. 58–74, 2014.

COSTA, J. J. F.; SILVA, E. B. da; COELHO, F. F.; TIECHER, T.; BISSANI, C. A.; FILIPPI, D. Atributos químicos relacionados à acidez e capacidade de troca de cátions de solos do Rio Grande do Sul com diferentes graus de intemperização. **Acta Iguazu**, v. 8, n. 2, p. 81–100, 2019.

COTRUFO, M. F.; SOONG, J. L.; HORTON, A. J.; CAMPBELL, E. E.; HADDIX, M. L.; WALL, D. H.; PARTON, W. J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 776–779, 2015.

CRUZ, M. R. DE O.; MAGALHÃES, M. M. DE. ROTAÇÃO DE CULTURAS E EFEITO SOBRE OS CUSTOS NA REFORMA DE CANAVIAL NA REGIÃO DA ALTA PAULISTA. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, p. 92–109, 2013.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. D'A.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. 39p. (Embrapa. Documentos, 141).

DIAS, L. E. **Uso de gesso como insumo agrícola**. Seropédica, RJ: Embrapa, 1992. 4 p. (Embrapa. Comunicado Técnico, 7).

DIAS, N. M. P.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Energia livre da reação de adsorção de cádmio em latossolos ácidos. **Ciência Rural**, v. 33, p. 829–834, 2003.

ESTEVEZ, R. L.; CHAMBO, A. P. S.; BARBOSA, J. D.; DA CRUZ, M. I. F. A cultura da canola (*Brassica napus* var. oleifera). **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 13, n. 1, p. 1–9, 2014.

FERREIRA, A. de O.; SÁ, J. C. M. de; LAL, R.; TIVET, F.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 1559–1567, 2018.

FOIS, D. A. F.; LANA, M. do C.; VERA, L. R. Q.; ALVAREZ, J. W. R.; ROJAS, C. A. L.; TIECHER, T. Efeito do gesso agrícola na disponibilidade de enxofre e no rendimento da soja e milho safrinha. **Revista Cultivando o Saber**, v. 10, n. 3, p. 314–326, 2017.

FOLONI, J. S. S.; SILVA, S. R.; BASSOI, M. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de. Efeitos da fertilização nitrogenada sobre a produtividade e acamamento de trigo cultivado sobre palhada de soja e milho. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 8.; SEMINÁRIO TÉCNICO DO TRIGO, 9., 2014, Canela; REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 9.; SEMINÁRIO TÉCNICO DO TRIGO, 10., 2015, Passo Fundo. **Anais [...]** Passo Fundo: Biotrigo Genética: Embrapa Trigo, 2015.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A. DE; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 627–646, 2001.

FRANCHINI, J. C.; BORKERT, C. M.; FERREIRA, M. M.; GAUDÊNCIO, C. A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 459–467, 2000.

FRANCHINI, J. C.; HOFFMAN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organic Composition of Green Manure During Growth and Its Effect on Cation Mobilization in an Acid Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, n. 13–14, p. 2045–2058, 2003.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M. da; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. 1. ed. Londrina (PR): Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; SOARES JUNIOR, D.; MELO, T. R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104877, 2021.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E. R. O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R. S.; FRIES, M. R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 325–334, 2003.

HARKER, K. N., J. T. O'DONOVAN, J. T.; TURKINGTON, T. K.; BLACKSHAW, R. E.; LUPWAYI, N. Z.; SMITH, E. G.; JOHNSON, E. N. ; GAN, Y.; KUTCHER, H. R.; DOSDALL, L. M.; PENG, G. Canola rotation frequency impacts canola yield and associated pest species. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 95, n. 1, p. 9–20, 2015.

HAYES, M. H. B.; SWIFT, R. S. Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water. **Advances in Agronomy**, v. 163, p. 1–37, 2020.

HOLANDA, J. M. F. de A.; LAZARINI, E.; SANCHES, I. R. Produção de matéria seca e composição bromatológica de milho e soja hidropônicos em palha de arroz e N em cobertura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, p. e26310615765–e26310615765, 2021.

HUNGRIA, M.; MENDES, I. C. Nitrogen Fixation with Soybean: The Perfect Symbiosis? Em: **Biological Nitrogen Fixation**. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2015. p. 1009–1024.

INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M. de; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. L. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 231, p. 156–165, 2016.

INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M. de; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. L. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? **Science of The Total Environment**, v. 599–600, p. 523–532, 2017.

JINDO, K.; SOARES, T. S.; PERES, L. E. P.; AZEVEDO, I. G.; AGUIAR, N. O.; MAZZEI, P.; SPACCINI, R.; PICCOLO, A.; OLIVARES, F. L.; CANELLAS, L. P. Phosphorus speciation and high-affinity transporters are influenced by humic substances. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, n. 2, p. 206–214, 2016.

KAEFER, J. E.; GUIMARÃES, V. F.; RICHART, A.; TOMM, G. O.; MÜLLER, A. L. Produtividade de grãos e componentes de produção da canola de acordo com fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 273–280, 2014.

KAPPES, C.; ONO, F. B.; SILVA, R. G. da. Importância do Milho safrinha e dos cultivos alternativos. In: DUARTE, A. P.; TSUNECHIRO, A.; FREITAS, R. S. (Ed). **3 décadas de inovações na cultura do milho safrinha: avanços e desafios**, 2021. Cap. 3, p. 41-68.

KUBO, C. T., MATA, J. de D. V. da, SILVA M. A. G da, SENGIK E., MUNIZ A.S., NEIRO E. da S. Produtividade de soja em plantio direto em sucessão ao trigo, aveia branca, aveia preta com e sem adubação nitrogenada. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 2, p. 235–240, 2007.

KUTCHER, H. R.; FERNANDO, W.G.D.; TURKINGTON, T.K.; MCLAREN, D.L. Best management practices for blackleg disease of canola. Best Management Practices for Blackleg Disease of Canola. **Prairie Soils Crops Journal**, v. 4, p. 122–134, 2011.

LAMBERS, H.; SHANE, M. W.; CRAMER, M. D.; PEARSE, S. J.; VENEKLAAS, E. J. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: Matching Morphological and Physiological Traits. **Annals of Botany**, v. 98, n. 4, p. 693–713, 2006.

LEITE, M. J. de H.; GOMES, A. D. V.; SANTOS, R. V. dos. Comportamento inicial do maracujazeiro em solos afetados por sais submetidos a tratamentos alternativos com o uso de coprodutos de mineradoras. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 3, p.401-413, 2015.

LENHANI, G., HACKBART, H., SANTOS, D., PINTO, V. EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CELULOSE DE PALHADA DE SOJA. In: IV CONGRESSO SUL BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 1., 2018, Guarapuava. **Anais [...]** Guarapuava: Unicentro/UFFS, 2018

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 310 p.

LOCATELLI, J. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; COELHO, A. E.; SANGOI, L.; BRATTI, F.; SAPUCAY, M. J. L. C.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Desempenho da sucessão soja/milho influenciado pelo consórcio milho/braquiária, adubação nitrogenada e densidade de plantas. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 14., 2019. Londrina. **Resumos expandidos [...]** Londrina: Embrapa Soja, 2019. 163 p. (Embrapa Soja. Documentos, 415)

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Portafos, 1997. 319 p.

MANGONI, A. P.; DIAS, P. M.; CONSTANTINO, V. L. A versatilidade das argilas e as propriedades dos sítios superficiais de interação. **Ecletica Química**, v. 40, n. 1, p. 192–203, 2015.

MARTINEAU, E.; DOMEQ, J.-C.; BOSCH, A.; DENORROY, P.; FANDINO, V. A.; LAVRES, J.; JORDAN-MEILLE, L. The effects of potassium nutrition on water use in field-grown maize (*Zea mays* L.). **Environmental and Experimental Botany**, v. 134, p. 62–71, 2017.

MATTUELLA, D.; SIMIONI, S. P.; SEGATTO, C.; CIGEL, C.; ADAMS, C. R.; KLEIN, C.; LAJUS, C. R.; SORDI, A. EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DA CULTURA DO TRIGO SUBMETIDA A DOSES DE NITROGÊNIO EM DIFERENTES ESTÁDIOS ONTOGÊNICOS. **Revista Ciência Agrícola**, v. 16, n. 3, p. 1–9, 2018.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MÜLLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1197–1206, 2011.

MAZZONCINI, SAPKOTA, T. B.; BÀRBERI, P.; ANTICHI, D.; RISALITI, R. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. **Soil and Tillage Research**, v. 114, n. 2, p. 165–174, 2011.

MELLO, D. A.; ESPERANCINI, M. S. T. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO CULTIVO DA SOJA EM ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS: RESULTADOS A PARTIR DE ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE OURINHOS/SP, NA SAFRA 2012/2013. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 30, n. 3, p. 280–288, 2015.

MELO, M. S. de; GUIMARÃES, G. B.; PONTES, H. S.; MASSUQUETO, L. L.; FIGURIM, I.; BAGATIM, H. Q.; GIANNINI, P. C. F. Carste em rochas não-carbonáticas: o exemplo dos arenitos da Formação Furnas, Campos Gerais do Paraná/Brasil e as implicações para a região. v. 22, n. 1, p. 81–95, 2011.

MELO, V. P.; SINGH, B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F. Chemical and Mineralogical Properties of Kaolinite-Rich Brazilian Soils. v. 65, n. 4, p. 1324–1333, 2001.

- MICHALIVICZ, L.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R. do; KRAMER, L. F. M. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1496–1505, 2014.
- MOHAMMADI, K.; ROKHZADI, A. An integrated fertilization system of canola (*Brassica napus* L.) production under different crop rotations. **Industrial Crops and Products**, v. 37, n. 1, p. 264–269, 2012.
- MOLIN, R. **Subsistemas de produção em plantio direto: explorando alternativas econômicas rentáveis para o inverno**. 1. ed. Castro, PR: Fundação ABC, 2008. 104 p.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Soybean and wheat response to cropping and tillage system after two decades in an Oxisol under subtropical climate in Brazil. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 3, p. 146–153, 2017.
- NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. Dias. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.
- NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Oportunidades e ameaças à contribuição da fixação biológica de nitrogênio em leguminosas no Brasil. In: **IBEROAMERICAN CONFERENCE ON BENEFICIAL PLANT-MICROORGANISM-ENVIRONMENT INTERACTIONS**, 2.; **NATIONAL MEETING OF THE SPANISH SOCIETY OF NITROGEN FIXATION**, 14.; **LATIN AMERICAN MEETING ON RHIZO BIOLOGY**, 26.; **SPANISH-PROTUGUESE CONGRESS ON NITROGEN FIXATION**, 3., 2013, Sevilla. **Anais [...]** Sevilla: Universidad de Sevilla; ALAR; SEFIN, 2013. p. 433-436.
- NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Boas práticas de inoculação em soja. In: **REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL**, 40., 2014, Pelotas. **Atas e Resumos [...]** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014. p. 40-45.
- NORA, D. D.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. da S.; MAZUCO, A. C. B.; PICCIN, M. 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. e0150541, 2017.
- NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.
- NUNES, R. O.; DOMICIANO, G. A.; ALVES, W. S.; MELO, A. C. A.; NOGUEIRA, F. C. S.; CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; ZINGALI, R. B.; SOARES, M. R. Evaluation of the effects of humic acids on maize root architecture by label-free proteomics analysis. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2019.
- OLSEN, S. R.; WATANABE, F. S. Interaction of Added Gypsum in Alkaline Soils with Uptake of Iron, Molybdenum, Manganese, and Zinc by Sorghum. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, n. 1, p. 125–130, 1979.

PAULETTI, V. **Nutrientes: Teores e interpretações**. 2. ed. Castro, PR: Fundação ABC, 2004. 86 p.

PAULETTI, V.; PIERRI, L. de; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495–505, 2014.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba - PR: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – NEPAR-SBCS, 2017. 289 p.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. D. M.; ZEMPULSK, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análises químicas de solo e controle da qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. (Circular Técnica, n.76).

PAVINATO, P. S.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A. Effects of Cover Crops and Phosphorus Sources on Maize Yield, Phosphorus Uptake, and Phosphorus Use Efficiency. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 1039–1047, 2017.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 911–920, 2008.

PENG, W. T.; ZHANG, L. D.; ZHOU, Z.; CHEN, Z. C.; LIAO, H. Magnesium promotes root nodulation through facilitation of carbohydrate allocation in soybean. **Physiologia Plantarum**, v. 163, n. 3, p. 372–385, 2018.

PEREIRA, A. P.; SCHOFFEL, A.; KOEFENDER, J.; CAMERA, J. N.; GOLLE, D. P.; HORN, R. C. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 4, p. 799–807, 2017.

PEREIRA, F. F. S.; MATSURA, E. E.; MOUSINHO, F. E. P.; BIZARI, D. R. RETENÇÃO DE ÁGUA EM NÍVEIS DE COBERTURA MORTA NO FEIJOEIRO IRRIGADO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO. **IRRIGA**, v. 20, n. 3, p. 557–569, 2015.

PÉREZ-LÓPEZ, R.; NIETO, J. M.; LÓPEZ-COTO, I.; AGUADO, J. L.; BOLÍVAR, J. P.; SANTISTEBAN, M. Dynamics of contaminants in phosphogypsum of the fertilizer industry of Huelva (SW Spain): From phosphate rock ore to the environment. **Applied Geochemistry**, v. 25, n. 5, p. 705–715, 2010.

PRESCOTT, C. E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? **Biogeochemistry**, v. 101, n. 1, p. 133–149, 2010.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. 2. ed. Piracicaba: NPCT - Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia, 2019.

RAMPIM, L.; LANA, M. do C.; FRANDOLOSO, J. F.; FONTANIVA, S. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1687–1698, 2011.

REEVE, N. G.; SUMNER, M. F. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochemophysica**, v. 4, n. 1, p. 1–5, 1972.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5º Aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG, 1999. 359 p.

RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. Aplicação superficial de calcário com diferentes teores de magnésio e granulometrias em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1723–1736, 2015.

RODRIGUES, L. A. T.; DIECKOW, J.; GIACOMINI, S.; OTTONELLI, A. S.; ZORZO, G. P. P.; BAYER, C. Carbon sequestration capacity in no-till soil decreases in the long-term due to saturation of fine silt plus clay-size fraction. **Geoderma**, v. 412, p. 115711, 2022.

ROSADO, T. L.; GONTIJO, I.; ALMEIDA; M.S. de; ANDRADE, F. V. Fontes e doses de nitrogênio e alterações nos atributos químicos de um latossolo cultivado com capim-mombaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 840–849, 2014.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 355–362, 2003.

ROSS, J. L. S. Superfícies de Erosão ou Erosão Química nos Processos de Esculturação dos Planaltos do Leste Paulista. **Revista Geosul da UFSC**, v. 14, p. 688–691, 1998.

SÁ, J. C. de M.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. de C.; FEIGL, B. E.; SANTOS, J. B. dos; FORNARI, A.; SÉGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE-FILHO, S. P.; PAULETTI, V.; SIQUEIRA NETO, M. O plantio direto como base do sistema de produção visando o seqüestro de carbono. **Revista Plantio Direto**, v. 14, p. 45–61, 2004.

SÁ, J. C. de M.; CERRI, C. C.; LAL, R.; DICK, W. A.; PICCOLO, M de C.; FEIGL, B. E. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 56–64, 2009.

SÁ, J. C. de M.; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z. dos; SANTOS, J. B. dos. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 38–50, 2014.

SÁ, J. C. de M.; SANTOS, J. B. dos; CANALLI, L. B. dos S.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J.; FERREIRA, A. de O.; BRIEDIS, C. Sistema Plantio Direto. In: BERTOL, O. J.; COLOZZI FILHO, A.; BARBOSA, G. M. de C.; SANTOS, J. B. dos; GUIMARÃES, M. de F. (Ed). **Manual de manejo e conservação do solo e da água para o estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba - PR: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – NEPAR-SBCS, 2019. p. 105-111.

SÁ, J. C. de M.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A. de O.; TIVET, F.; FERREIRA, A. de O.; GONÇALVES, D. R. P.; CANALLI, L. B. dos S.; SANTOS, J. B. dos; ROMANIW, J. Can C-budget of natural capital be restored through conservation agriculture in a tropical and subtropical environment? **Environmental Pollution**, v. 298, p. 118817, 2022.

SALOMÃO, P. E. A.; KRIEBEL, W.; SANTOS, A. A. dos; MARTINS, A. C. E. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e154911870–e154911870, 2020.

SANTOS, D. R. DOS; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, p. 576–586, 2008.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, H. P. dos; TOMM, G. O.; AMBROSI, I.; IGNACZAK, J. C.; WOBETO, C.; SATTER, R. **Sistemas de rotação de culturas para trigo, sob sistema plantio direto, durante dez anos, em Guarapuava, PR**. Passo Fundo: Embrapa-CNPT, 1998. 80 p.

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; OLIVEIRA, J. T. de. Gramíneas anuais de inverno. Em: **FORAGEIRAS PARA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA REGIÃO SUL-BRASILEIRA**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. p. 41–78.

SANTOS, E. F.; MATEUS, N. S.; ROSÁRIO, M. O.; GARCEZ, T. B.; MAZZAFERA, P.; LAVRES, J. Enhancing potassium content in leaves and stems improves drought tolerance of eucalyptus clones. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 552–563, 2021.

SILVA, F. A. M. da; PINTO, H. S.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milho e soja utilizadas em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 717–724, 2006.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de Gesso Agrícola nos Solos dos Cerrados**. 1. ed. Planaltina, DF: Embrapa, 1995. 20 p. (Embrapa- CPAC. Circular Técnica, 32).

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de Gesso Agrícola nos Solos do Cerrado**. 2. ed. ed. Planaltina, DF: Embrapa, 2005. 19 p. (Embrapa Cerrado. Circular Técnica, 32).

SOUZA, A. C.; OLIVARES, F. L.; PERES L. E. P.; PICCOLO, A.; CANELLAS L. P. Plant hormone crosstalk mediated by humic acids. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 9, n. 1, p. 29, 2022.

SOUZA JUNIOR, I. G. de; COSTA, A. C. S. da; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, v. 40, p. 513–519, 2010.

SOUZA, L. H.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V; V. H.; VILLANI, E. M. de A. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1641–1652, 2010.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1301–1309, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. In: De Oliveira, P. L. (Ed). **Estresse Abiótico**. Porto Alegre: Artmed, 2017. Cap. 24, p. 734-758.

TELES, A. P. B.; RODRIGUES, M.; HERRERA, W. F. B.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, v. 33, n. 1, p. 34–44, 2017.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. Centerton, N.J.: Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, 1967.

TIECHER, T.; CALEGARI, A.; CANER, L.; SANTOS, D. R. dos. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, v. 308, p. 78–85, 2017.

TIECHER, T.; PIAS, O. H. de C.; BAYER, C.; MARTINS, A. P.; DENARDIM, L. G. de O.; ANGHINONI, I. 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. e0170025, 2018.

CASTRO, T. A. van T. de; GARCIA, A. C.; TAVARES, O. C. H.; PEREIRA, E. G.; SOUZA, C. da C. B.; TORCHIA, D. F. de O.; PINHO, C. F. de; CASTRO, R. N. Humic acids induce a eustress state via photosynthesis and nitrogen metabolism leading to a root growth improvement in rice plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 171–184, 2021.

CASTRO, T. A. van T. de; BERBARA, R. L. L.; TAVARES, O. C. H.; MELLO, D. F. da G.; PEREIRA, E. G.; SOUZA, C. da C. B.; ESPINOSA, L. M.; GARCIA, A. C. Humic acids affect photosynthetic quantum efficiency in rice under water deficit. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 34, n. 4, p. 463–483, 2022.

VICENSI, M.; MÜLLER, M. M. L.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R. do; MICHALOVICZ, L.; LOPES, C. Do Rates and Splitting of Phosphogypsum Applications Influence the Soil and Annual Crops in a No-Tillage System? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

VIDALETTI, V. F.; MARINS, A. C. de; SECCO, D.; RIZZI, R. L.; CHANG, P. Impacto da cobertura do solo, declividade e precipitação na infiltração de água no solo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, p. e193101724562–e193101724562, 2021.

- VIEIRA, R. C. B.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; MORAES, R. P. de; CARNIEL, E. Adubação Fosfatada para Alta Produtividade de Soja, Milho e Cereais de Inverno Cultivados em Rotação em Latossolos em Plantio Direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 794–808, 2015.
- VIOLA, R.; BENIN, G.; CASSOL, L. C.; PINNOW, C.; FLORES, M. F.; BORNHOFEN, E. Adubação verde e nitrogenada na cultura do trigo em plantio direto. **Bragantia**, v. 72, p. 90–100, 2013.
- VOLSI, B.; BORDIN, I.; HIGASHI, G. E.; TELLES, T. S. Economic profitability of crop rotation systems in the Caiuá sandstone area. **Ciência Rural**, v. 50, p. e20190264, 2020.
- WEIRICH NETO, P. H.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L. de C. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1186–1192, 2006.
- WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; SANTOS, K. F. dos; WENER, R. de S.; BAGIO, B. Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 2, p. 134–143, 2016.
- WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; SANTOS, K. F. dos; MUZEKA, L. M. Plantas de cobertura do solo e seus efeitos nas propriedades físicas e produtividade de soja e milho. **Scientia Agraria Paranaensis**, p. 272–281, 2018.
- WOŹNIAK, A. Effect of Crop Rotation and Cereal Monoculture on the Yield and Quality of Winter Wheat Grain and on Crop Infestation with Weeds and Soil Properties. **International Journal of Plant Production**, v. 13, n. 3, p. 177–182, 2019.
- ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 37, p. 110–117, 2007.
- ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Liming and ionic speciation of an Oxisol under no-till system. *Scientia Agrícola*, v. 65, p. 190-203, 2008.
- ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 128–137, 2015.
- ZIECH, A. R. D.; CONCEIÇÃO, P. C.; LUCHESE, A. V.; BALIN, N. M.; CANDIOTTO, G.; GARMUS, T. G. Proteção do solo por plantas de cobertura de ciclo hibernal na região Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 374–382, 2015.