

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

GRAZIELLE SCHORNOBAI

SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE LONGA DURAÇÃO NA MELHORIA DO PERFIL DO
SOLO SOB PLANTIO DIRETO

PONTA GROSSA

2023

GRAZIELLE SCHORNOBAI

SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE LONGA DURAÇÃO NA MELHORIA DO PERFIL DO
SOLO SOB PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada a Universidade Estadual de Ponta Grossa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia na Área de Concentração em Uso e Manejo do Solo, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Eduardo Fávero Caires

PONTA GROSSA

2023

S374 Schornobai, Grazielle

Sistemas de produção de longa duração na melhora do perfil do solo sobplântio direto / Grazielle Schornobai. Ponta Grossa, 2023.

70 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.

1. Rotação de culturas. 2. Qualidade do solo. 3. Agricultura de conservação. 4. Acúmulo de carbono. 5. Enzimas do solo. I. Caires, Eduardo Fávero. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ciência do Solo e Recursos Ambientais.III.T.

CDD: 631



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Sistemas de produção de longa duração na melhoria do perfil do solo sob plantio direto”.**

Nome: **Grazielle Schornobai**

ORIENTADOR: EDUARDO FÁVERO CAIRES

Aprovado pela Comissão Examinadora:

**PROF. DR. EDUARDO FÁVERO
CAIRES DR. HÉLIO ANTONIO
WOOD JORIS**

Dr. Gabriel Barth

**PONTA GROSSA, 28 DE JULHO DE
2023.**



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Favero Caires, Professor(a)**, em 28/07/2023, às 12:27, 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 28/07/2023, às 19:03, conforme Resolução UEPGCA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Barth, Usuário Externo**, em 15/08/2023, às 17:17, 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 **1547574** e o código CRC **AFB38E7B**.

DEDICO

Aos meus pais, Maria Dircélia Zubacz Schornobai e João Antonio Schornobai,
pelo amor sem medidas e o apoio de sempre.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por ter me amparado e guiado por caminhos que me fizeram estar aqui hoje.

A meus pais, Maria Dircélia Zubacz Schornobai e João Antonio Schornobai, pelo amor incondicional, pelo apoio e por nunca medirem esforços para me proporcionarem o melhor.

A todos os meus familiares e amigos por todo o carinho, em especial a minha amiga/irmã Ana Eduarda Taras Vaz, minha prima/irmã Daiane Hyeda e ao meu namorado Matheus Carneiro Lechman que sempre me acolheram, escutaram e incentivaram.

Ao meu orientador, Professor Doutor Eduardo Fávero Caires, por todos os ensinamentos e orientação.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Fertilidade do Solo e Adubação, pelo auxílio nas atividades e pela convivência agradável. Em especial ao meu inicialmente coorientador em 2018 e agora grande amigo, Vanderson Modolon Duarte, que me ensinou desde noções básicas de laboratório até lições para a vida.

A Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade de me graduar e me especializar em uma instituição pública e de qualidade.

A fundação CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

A Fundação ABC pelo fornecimento da área experimental e por todo apoio a esse trabalho.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma maneira possibilitaram a realização dessa pesquisa.

RESUMO

O sistema plantio direto, com rotação diversificada de culturas, é uma das estratégias mais eficazes para melhorar a sustentabilidade da agricultura em regiões tropicais e subtropicais. Os benefícios dos sistemas de produção nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo são nítidos em longo prazo. Um experimento de longa duração foi realizado em um Latossolo Vermelho mesoférico argiloso na região dos Campos Gerais do Paraná, com seis sistemas de produção: I: ervilhaca-milho-aveia-soja-trigo-soja (ER-MI-AV-SO-TR-SO), II: aveia-milho-trigo-soja (AV-MI-TR-SO), III: trigo-soja (TR-SO), IV: azevém-milho-avevém-soja (AZ-MI-AZ-SO), V: alfafa-milho (ALF-MI) e VI: ervilhaca-milho-trigo-soja (ER-MI-TR-SO). Após 31 anos de condução desses sistemas, amostras estratificadas foram coletadas no perfil do solo nas camadas de 0–10, 10–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100, 100–130, 130–160 e 160–200 cm. Nessas amostras de solo foram determinados a acidez ativa (pH em CaCl_2 e pH em água), o ΔpH (pH em KCl – pH em água), a acidez trocável (Al), a acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) e os teores de C orgânico total (COT), C extraído em água quente (CAQ), C oxidável em permanganato de potássio (COXP), N total (NT), Ca, Mg, K, P, S-SO_4^{2-} , B, Fe, Mn, Zn e Cu. A densidade do solo também foi determinada nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm e os estoques de COT, CAQ, COXP e NT foram calculados na camada de 0–20 cm. O sistema semiperene ALF-MI se destacou proporcionando maiores incrementos de COT, K, S-SO_4^{2-} e B em profundidade, e maiores teores de NT, P, Ca, Cu, Fe, Zn e Mn nas camadas mais superficiais do solo. Não foram encontradas diferenças significativas entre os sistemas de produção para a densidade do solo e os estoques de COT, CAQ, COXP e NT. Após 31 anos, o sistema AV-MI-TR-SO apresentou o maior aporte de C. Durante esse período, o sistema ER-MI-TR-SO apresentou o maior rendimento de grãos de milho e soja por safra, destacando a importância de uma rotação diversificada de culturas e do cultivo de leguminosas antecedendo o milho para a melhoria na disponibilidade de N no solo. A atividade da enzima β -glicosidase foi maior no sistema ALF-MI, o qual acumulou mais COT no solo.

Palavras-chave: rotação de culturas, qualidade do solo, agricultura de conservação, acúmulo de carbono, enzimas do solo.

ABSTRACT

No-till systems with diversified crop rotations have stood out as one of the most effective strategies to improve the sustainability of farming in tropical and subtropical regions. The benefits of production systems on the chemical, physical, and biological attributes of the soil are more evident in the long term. A long-term experiment was conducted on a clayey mesoferic Red Latosol in the Campos Gerais region of Parana, Brazil, involving six production systems: I: hairy vetch-corn-oat-soybean-wheat-soybean (HV-CO-OA-SO-WH-SO), II: oat-corn-wheat-soybean (OA-CO-WH-SO), III: wheat-soybean (WH-SO), IV: ryegrass-corn-ryegrass-soybean (RY-CO-RY-SO), V: alfalfa-corn (ALF-CO), and VI: hairy vetch-corn-wheat-soybean (HV-CO-WH-SO). After 31 years of establishing these systems, soil samples were collected in the soil profile at depths of 0–10, 10–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100, 100–130, 130–160, and 160–200 cm. The samples were analyzed for active acidity (pH in CaCl_2 and pH in water), ΔpH (pH in KCl – pH in water), exchangeable acidity (Al), total acidity (H + Al), and the contents of total organic carbon (TOC), hot water-extracted carbon (HWE), permanganate-oxidizable carbon (POXC), total nitrogen (TN), calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), phosphorus (P), sulfur-sulfate ($\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$), boron (B), iron (Fe), manganese (Mn), zinc (Zn), and copper (Cu). Soil density was also determined at the 0–10 and 10–20 cm depths, and stocks of TOC, HWE, POXC, and TN were calculated in the 0–20 cm layer. The ALF-CO semiperennial system stood out, providing greater increments of TOC, K, S-SO_4^{2-} and B in depth, and higher levels of NT, P, Ca, Cu, Fe, Zn, and Mn in the soil surface layers. No significant differences were found between production systems for bulk density and TOC, CAQ, COXP and NT stocks. After 31 years, the OA-CO-WH-SO system had the highest C input. In this same period, the HV-CO-WH-SO system had the highest corn and soybean grain yields per season, highlighting the importance of a diversified crop rotation and the cultivation of legumes before corn for improving the availability of N in the soil. The β -glucosidase enzyme activity was higher in the ALF-MI system, which accumulated more TOC in the soil.

Keywords: crop rotation, soil quality, conservation agriculture, carbon accumulation, soil enzymes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Média histórica de precipitação pluvial e de temperatura máxima e mínima na região de Ponta Grossa/PR durante os meses de janeiro a dezembro (IAPAR, 2023).....	26
Figura 2	Valores de pH (A) e de Δ pH (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	33
Figura 3	Teores de Al^{3+} trocável (A) e valores de saturação por Al^{3+} (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	36
Figura 4	Teores de Al^{3+} trocável (A) e valores de saturação por Al^{3+} (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	39
Figura 5	Teores de P extraídos com solução de Mehlich-1 (A) e resina de troca aniônica (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	40
Figura 6	Teores de potássio (A) e enxofre (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	43
Figura 7	Teores de B em diferentes profundidades no solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	44
Figura 8	Teores de Cu (A) e Fe (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	45
Figura 9	Teores de Mn (A) e Zn (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	47
Figura 10	Teores de C orgânico total (A) e N total (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	48
Figura 11	Densidade do solo nas profundidades de 0–10 cm (A) e 10–20 cm (B) em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	51
Figura 12	Estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) na camada de 0–20 cm em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	54
Figura 13	Estoques de carbono oxidável em permanganato de potássio (COXP) e carbono em água quente (CAQ) na camada de 0–20 cm em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto (* $p < 0,05$).....	54

Figura 14	Produtividade média de grãos de soja no período de 1989 a 2021 em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	56
Figura 15	Produtividade média de grãos de milho no período de 1989 a 2021 em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Distribuição granulométrica da área experimental. Fundação ABC, Ponta Grossa/PR.....	27
Tabela 2	Identificação e caracterização dos tratamentos (sistemas de culturas) e tipo de rotação em sistema plantio direto durante 31 anos em Latossolo Vermelho mesoférico. Fundação ABC, Ponta Grossa/PR.....	27
Tabela 3	Quantidades de calcário e de N, P ₂ O ₅ , K ₂ O, S-SO ₄ ²⁻ e Zn ²⁺ via fertilizantes adicionadas no solo durante o período de 1989 a 2020 (31 anos) nos diferentes sistemas de produção sob plantio direto de longa duração. Fundação ABC, Ponta Grossa/PR.....	28
Tabela 4	Acúmulo de C da biomassa de resíduos no período de 1989 a 2021 em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto (*p<0,05).....	55
Tabela 5	Atividade das enzimas arilsulfatase e β-glicosidase em amostras secas de solo na camada de 0–10 cm em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto (*p<0,05).....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	ADOÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO COMO PRÁTICA SUSTENTÁVEL NA AGRICULTURA DE CLIMA TROPICAL E SUBTROPICAL.....	14
2.2	ROTAÇÃO DE CULTURAS E MAUTENÇÃO DA PALHADA NO SISTEMA PANTIO DIRETO.....	15
2.3	CICLAGEM DE NUTRIENTES.....	17
2.4	DINÂMICA E DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES NO SOLO.....	19
2.5	ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....	21
2.6	ATIVIDADE BIOLÓGICA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	22
2.7	ROTAÇÃO DE CULTURAS E RENDIMENTO DE GRÃOS.....	23
3	OBJETIVOS.....	24
3.1	OBJETIVO GERAL.....	24
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4	HIPÓTESES.....	25
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
5.1	LOCAL DO ESTUDO, CARACTERIZAÇÃO DO SOLO, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	26
5.2	COLETA E PREPARO DE AMOSTRAS DE SOLO.....	28
5.3	AVALIAÇÕES.....	29
5.3.1	Análises Químicas de Solo.....	29
5.3.2	Densidade do Solo.....	29
5.3.3	Estoque de C orgânico total, N Total, CAQ e COXP.....	29
5.3.4	Aporte de C pela Biomassa das Culturas e Rendimento de Grãos.....	30
5.3.5	Atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase.....	30
5.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	31
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
6.1	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO.....	32
6.2	DENSIDADE DO SOLO.....	50
6.3	ESTOQUES DE COT, NT, CAQ E COXP.....	52

6.4	APORTE DE C PELA BIOMASSA DAS CULTURAS E RENDIMENTO DE GRÃOS.....	55
6.5	ATIVIDADE DAS ENZIMAS ARILSULFATASE E β -GLICOSIDASE NO SOLO.....	58
7	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de produtos agropecuários, respondendo atualmente por cerca de 6,5% do mercado global da produção de grãos (FAO, 2023). Na última safra (2022/23), a produção de grãos no país está estimada em 312,5 milhões de toneladas (CONAB, 2023).

Visando o retorno econômico em curto prazo, é comum a adoção de sistemas de produção pouco diversificados (GARBELINI *et al.*, 2020). Na região Centro-Sul do Paraná, a sucessão trigo-soja é a mais adotada (FRANCHINI *et al.*, 2012). Porém, a baixa diversidade de plantas torna o sistema de produção cada vez mais ineficiente e menos sustentável, levando a rendimentos estagnados e altos custos de produção (CANALLI *et al.*, 2020).

A intensificação da agricultura gerada pela crescente demanda mundial por alimentos, trouxe também à tona a necessidade da adoção de práticas cada vez mais sustentáveis que combinem aumentos na produtividade vegetal e animal com preservação dos recursos naturais.

Os fomentos para adoção de práticas mais sustentáveis vêm tanto da iniciativa privada quanto da iniciativa pública, sendo o principal projeto ao nível governamental o Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono). Estima-se que através dele haja a compensação de 22,3% na emissão mundial de carbono (C) no período de 2021 a 2035. O sistema plantio direto é capaz de mitigar os efeitos das mudanças climáticas globais em 24,3%, mas aliado a outras práticas, o resultado pode ser ainda melhor, por exemplo, com a recuperação de pastagens degradadas e intensificação da pecuária (31%) e a adoção de sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta (25,6%) (SÁ *et al.*, 2016).

O sistema plantio direto com rotação diversificada de culturas, manutenção de cobertura permanente e ausência de revolvimento, é a chave para o desenvolvimento de maior sustentabilidade da agricultura em solos de clima tropical e subtropical (CAIRES *et al.*, 2008).

A rotação diversificada de culturas, quando bem planejada, traz maior retorno econômico para o produtor, bem como proporciona melhorias na qualidade química, física e biológica do solo. A alternância de culturas com boa produção de fitomassa e sistema radicular abundante e agressivo aumenta o conteúdo de matéria orgânica, bem como a ciclagem e o armazenamento de nutrientes.

Os benefícios do sistema de produção com maior diversificação são mais pronunciados em longa duração (> 20 anos) (ANGHINONI, 2007). No entanto, são escassas as pesquisas

relacionadas à influência de diferentes sistemas de produção de longa duração sob plantio direto nos atributos químicos do solo, especialmente em camadas mais profundas. Destaca-se que em regiões de clima tropical e subtropical, os solos são bastante intemperizados e apresentam baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e intensa perda de bases. Para tais solos, a matéria orgânica representa uma importante fonte de nutrientes (ERNANI *et al.*, 2004).

Considerando a importância da rotação diversificada de culturas e do aporte de palha no sistema plantio direto para a melhoria da qualidade do solo e da sustentabilidade agrícola, este estudo foi realizado com o objetivo de avaliar as alterações nos atributos químicos do solo até 200 cm de profundidade, bem como a densidade, o estoque de C e nitrogênio (N), e a atividade biológica do solo em função de diferentes sistemas de produção em uma área experimental manejada há longo período (31 anos) sob plantio direto na região dos Campos Gerais do Paraná.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ADOÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO COMO PRÁTICA SUSTENTÁVEL NA AGRICULTURA TROPICAL E SUBTROPICAL

O sistema plantio direto é uma técnica conservacionista de manejo de solo que se baseia em três princípios básicos (FAO, 2014): (i) não revolvimento do solo, (ii) cobertura permanente do solo e (iii) rotação de culturas. As práticas nele realizadas visam minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão, procurando manter os atributos químicos e estruturais do solo e, assim, aumentar a rentabilidade das áreas de exploração agrícola (MUZILLI, 1981; EMBRAPA, 1998).

No Brasil, as primeiras tentativas de adoção desse sistema ocorreram no início da década de 1970. Essa iniciativa surgiu por interesse dos próprios produtores, os quais estavam tendo problemas com a intensa degradação ambiental provocada pela erosão dos solos, causando aumento nos custos de produção a ponto de tornar a atividade agropecuária insustentável. Após um período inicial difícil para vencer as dificuldades encontradas com a adoção do novo sistema, houve uma grande expansão da área sob plantio direto a partir dos anos 1990 (ANGHINONI, 2007). Atualmente, cerca de 33 milhões de hectares têm sido manejados sob plantio direto na agricultura brasileira (FEBRAPDP, 2023) e, desde a sua adoção, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos para entender a dinâmica dos componentes do solo submetido a esse manejo.

Com o aumento das áreas de cultivo sob sistema plantio direto no Brasil, pesquisas vêm sendo realizadas para entender a dinâmica dos componentes do solo submetido a esse sistema de manejo, visto que o não revolvimento do solo e o aumento no conteúdo de matéria orgânica aumentam a disponibilidade de nutrientes (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Os resultados da utilização do sistema plantio direto são ainda mais satisfatórios em longo prazo, pois o sistema, quando em fase de manutenção, apresenta elevado acúmulo de palhada, fluxo contínuo de C e N, ciclagem de nutrientes ainda mais eficiente e maior retenção de água (ANGHINONI, 2007).

Nos últimos tempos, a adoção do sistema plantio direto vem recebendo cada vez mais fomento, tanto privado quanto público, como sistema de produção de alimentos mais sustentável, na perspectiva de que o mesmo concilia crescimento da produção, redução da pobreza e preservação ambiental, particularmente no que diz respeito à gestão do solo e da água (OCDE e FAO, 2015; CASSOL *et al.*, 2007).

2.2 ROTAÇÃO DE CULTURAS E MANUTENÇÃO DA PALHADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

O aporte de elevada quantidade de resíduos vegetais ao solo é um dos principais requisitos para o sucesso do sistema plantio direto em regiões tropicais e subtropicais. Por isso, tem-se buscado inserir na rotação de culturas espécies com elevada capacidade de produção de biomassa (parte aérea e raízes). Essa técnica é fundamental para a melhoria da qualidade do solo em tal sistema, alterando positivamente os atributos químicos, físicos e biológicos, principalmente quando conduzida de forma adequada e por um longo período.

A rotação de culturas é uma estratégia importante para reduzir a erosão do solo, bem como o consumo e a emissão de gases do efeito estufa (GEE), aumentar a eficiência no uso de água e fertilizantes, e ajudar no controle de doenças e pragas através da rotação de espécies com diferentes suscetibilidades (GEBREMEDHIN; SCHWAB, 1998; SANTOS *et al.*, 2019; GARBELINI *et al.*, 2022).

Por definição, a rotação de culturas é o cultivo de forma sistemática sem repetição de uma mesma cultura em uma mesma área por um dado período de tempo (SOUZA *et al.*, 2012). O fato de o Brasil ser um país com dimensões continentais, a escolha das espécies que irão compor essa alternância varia de acordo com os sistemas de produção e as características edafoclimáticas e socioeconômicas em questão.

Preconiza-se a utilização de plantas com boa produção de fitomassa (parte aérea e raízes), sistema radicular agressivo, rápido desenvolvimento/estabelecimento e capacidade de incorporar N ao solo pela fixação biológica ou pela reciclagem no sistema (FERNANDES *et al.*, 2019; FRANCHINI *et al.*, 2000, 2012; SILVEIRA NETO *et al.*, 2006), mas que também se caracterizem como cultivos rentáveis, principalmente no inverno. Tais plantas podem ser forrageiras, gramíneas e leguminosas, anuais ou semiperenes.

As gramíneas, como é o caso do milho, trigo, aveia e azevém, possuem abundante produção de biomassa pela parte aérea com alta relação C:N, o que permite que a decomposição da palhada seja mais lenta. Essa decomposição lenta da palhada vai proporcionar liberação gradual de nutrientes para as culturas posteriores, bem como proteção do solo contra o impacto da chuva por um período maior de tempo. Outra característica dessa família de plantas é o sistema radicular fasciculado e vigoroso, o que vai auxiliar na descompactação do solo, construção de bioporos e estruturação do solo. Essa característica de sistema radicular vigoroso também irá favorecer a ciclagem de nutrientes em camadas mais profundas do solo. Espécies

cultivadas nas estações mais frias podem auxiliar no manejo de plantas daninhas devido ao efeito alelopático da sua palhada (BORGHI *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2012; CARVALHO *et al.*, 2022).

As leguminosas, tanto anuais, como a soja e a ervilhaca, quanto semiperenes, como a alfafa, têm como principal característica a capacidade de incorporar N no sistema através da associação com microrganismos (fixação biológica de N₂). Estima-se que a cultura da soja seja capaz de fixar 90 kg ha⁻¹ de N a cada ciclo (ARF *et al.*, 2018). Tais plantas possuem baixa relação C:N, o que favorece a decomposição, a ciclagem e a disponibilidade de nutrientes para os cultivos seguintes (DUDA *et al.*, 2003; SILVA *et al.*, 2012; CARVALHO *et al.*, 2022).

Em regiões de clima mais quente, como é o caso do Cerrado brasileiro, há predomínio da monocultura de soja ou da sucessão soja/milho (CARVALHO, 2020; KAPPES; ZANCANARO, 2014). Nessas localidades, a cobertura permanente do solo é dificultada, pois devido às altas temperaturas e ao curto período de chuvas, as culturas deixam quantidades insuficientes de palha para o recobrimento do solo e a sua palhada se decompõe rapidamente. Portanto, em áreas com predomínio da monocultura de soja, recomenda-se a rotação com gramíneas como arroz, milheto, pastagens, dentre outras, visto que elas possuem sistema radicular eficiente em absorver água de camadas mais profundas, além de apresentarem maior tolerância à seca (SCHOO *et al.*, 2017).

Na região Sul do Brasil, dada a importância da atividade agropecuária, as culturas utilizadas na rotação visam tanto a produção de grãos quanto a produção de biomassa destinada à alimentação animal. As culturas frequentemente utilizadas incluem soja, milho, trigo e aveia. Mesmo assim, é comum a sucessão de culturas, sendo essa uma prática muito utilizada nessa região, com duas espécies sendo cultivadas uma em sequência da outra, em um mesmo local e no mesmo ano agrícola (SEDIYAMA, 2009).

Esta prática tende a provocar degradação física, química e biológica do solo, com diminuição na disponibilidade de nutrientes devido às mudanças na atividade biológica e à degradação física do solo, cujas condições são favoráveis para o desenvolvimento de pragas e doenças, além da diminuição do desenvolvimento do sistema radicular e do conteúdo de matéria orgânica (CARVALHO *et al.*, 2007; SEDIYAMA, 2009; LI *et al.*, 2019). O uso contínuo dessa prática pode prejudicar a capacidade produtiva do solo, o lucro dos produtores e a sustentabilidade (GARBELINI *et al.*, 2022).

2.3 CICLAGEM DE NUTRIENTES

Um dos fatores que mais contribui para a sustentabilidade do plantio direto é a ciclagem contínua de nutrientes gerada, principalmente, pela rotação diversificada de culturas. Nesse processo, os resíduos orgânicos depositados sobre a superfície do solo vão passar pelo processo de decomposição e vão servir como fonte de nutrientes para as culturas subsequentes. A velocidade de decomposição e liberação de nutrientes no sistema varia de acordo com a composição da palhada, especialmente entre leguminosas e gramíneas. As leguminosas, por terem menor relação C:N irão apresentar decomposição mais acelerada, ocorrendo o contrário no caso das gramíneas (CARNEIRO *et al.*, 2008).

Devido à força da atividade agropecuária na região Centro-Sul do Paraná, as lavouras são destinadas tanto para a produção de grãos, cobertura do solo ou material vegetal para a produção animal. A finalidade que a cultura será instalada vai influenciar na quantidade de nutrientes que a mesma vai fornecer ao solo.

Sistemas de produção que combinem o cultivo de duas famílias, bem como culturas que tenham exigências nutricionais diferentes, como por exemplo alfafa-milho, irão se destacar tanto pelo aporte de fitomassa como pela liberação de nutrientes, os quais serão importantes para o suprimento das necessidades das culturas subsequentes (ANGHINONI, 2007). Estudos mostraram que a fixação de N por forrageiras de inverno é um fator importante no acúmulo de C no solo (SISTI *et al.*, 2004). Já, forrageiras que têm como finalidade a alimentação animal, devido aos eventos de rebrote estimulados pelo corte e pastejo, acabam aportando mais C ao solo, devido ao maior aporte de biomassa através do seu sistema radicular (SANTOS *et al.*, 2011).

As principais culturas utilizadas no verão, milho e soja, além do retorno econômico proporcionado pela comercialização dos grãos, quando manejadas de forma inteligente, trazem benefícios para o solo. O milho, devido à sua grande produção de biomassa, disponibiliza no solo, em média, 217 kg ha⁻¹ de N, 42 kg ha⁻¹ de P e 157 kg ha⁻¹ de K (CARVALHO *et al.*, 2022). Já, a cultura da soja, mesmo possuindo porte menor, pode fixar 90 kg ha⁻¹ de N e fornecer 11 kg ha⁻¹ de P e 47 kg ha⁻¹ de K (CARVALHO *et al.*, 2022).

Das plantas utilizadas durante o inverno, a aveia, preta ou branca, incorporam cerca de 130 kg ha⁻¹ de N, de 12 a 23 kg ha⁻¹ de P, e de 200 a 340 kg ha⁻¹ de K. A aveia é apontada como a cultura responsável pela expansão do sistema plantio direto na região Sul do Brasil (SALTON

et al., 2001). É a cultura preferida quando se trata de forrageira de inverno devido à sua rusticidade, capacidade de produção de biomassa, seja para a alimentação animal ou proteção do solo, antecedendo as culturas de soja ou milho, justamente por apresentar alto potencial de acúmulo e reciclagem de N, e por possuir sistema radicular profundo (EMBRAPA, 2012). Esse sistema radicular profundo permite reciclar K presente nas camadas profundas para camada superficial do solo. A cultura também recicla Ca e Mg, podendo retornar ao solo, em média, 68 kg ha⁻¹ de Ca e 20 kg ha⁻¹ de Mg.

O trigo é a cultura mais comumente utilizada no sistema plantio direto visando a produção de grãos durante o inverno na região Sul do Brasil. O Estado do Paraná é um dos destaques na produção nacional de trigo (CONAB, 2023). A decomposição da palhada de trigo fornece, em média, 25 kg ha⁻¹ de N, 3 kg ha⁻¹ de P e 18 kg ha⁻¹ de K. Outra gramínea de inverno de grande importância na região Sul do Brasil é o azevém que, geralmente, é destinado à alimentação animal (pastejo ou corte) e possui alta produção de massa seca com valor nutricional elevado, principalmente em N.

Com relação às leguminosas de inverno, as ervilhas, tanto para forragem quanto para produção de grãos, formam associações simbióticas com bactérias fixadoras de N₂, e podem fixar, em média, 144 kg ha⁻¹ de N, 25 kg ha⁻¹ de P e 185 kg ha⁻¹ K. A alfafa é uma leguminosa forrageira perene de clima quente que tolera uma grande amplitude de temperatura e suporta longos períodos de seca. A alfafa tem maior tolerância ao estresse hídrico quando comprada com outras leguminosas, fixa N₂ atmosférico e não apresenta grande exigência nutricional, embora responda à adubação fosfatada (MISLEVY, 1985).

O fornecimento de N pelas leguminosas é tão significativo para o cultivo posterior que as recomendações de N para a cultura do milho têm sido baseadas no teor de matéria orgânica do solo e na cultura antecessora (gramínea, leguminosa ou consórcio), considerando determinados tetos de produtividade (AMADO *et al.*, 2002; FONTOURA; BAYER 2009).

A ciclagem de nutrientes melhora a fertilidade do solo por meio da disponibilização de nutrientes para as culturas sucessoras proveniente da decomposição de resíduos orgânicos. Além disso, o aporte de resíduos orgânicos vai incrementar C, aumentando seu estoque no solo e evitando a sua perda para a atmosfera na forma de GEE (SANTOS *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2019).

2.4 DINÂMICA E DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES NO SOLO

A ausência de revolvimento do solo no sistema plantio direto leva a um maior acúmulo de nutrientes na camada superficial, mas esse comportamento pode ser alterado pelo sistema radicular das culturas. A presença de resíduos vegetais na superfície em sistema plantio direto pode proporcionar aumento no pH e nos teores de Ca e Mg trocáveis, inclusive em camadas mais profundas do solo, em detrimento do teor de Al trocável (FRANCHINI *et al.*, 2000).

No solo, o nitrogênio (N) está presente predominantemente na forma orgânica, em cerca de 97-98% do N-total. As frações inorgânicas, forma passível de ser absorvida pelas plantas, são compostas, principalmente, por NH_4^+ e NO_3^- , e a maioria do N inorgânico é proveniente da mineralização da matéria orgânica do solo. Portanto, o tipo e o manejo do solo irão influenciar na quantidade de matéria orgânica e, consequentemente, em maior ou menor taxa de disponibilidade de N inorgânico. O sistema plantio direto, devido ao alto aporte de material vegetal fresco que conta com C orgânico disponível como fonte de energia, tende a apresentar maior reciclagem de N do que sistemas mais pobres no fornecimento de resíduos vegetais. Em um sistema consolidado, de longa duração, a liberação de N é ainda maior, devido ao maior acúmulo de matéria orgânica (ANGHINONI, 2007; CANTARELLA, 2007).

A absorção de fósforo (P) se dá predominantemente na forma aniônica de H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} (DECHEN; NACHTIGALL, 2007). O não revolvimento do solo, a utilização de fertilizantes fosfatados na camada superficial e a deposição de resíduos pelas culturas leva a um acúmulo de P a partir da superfície do solo. O não revolvimento do solo reduz o contato entre os colóides do solo e os íons fosfato, e também causa aumento nas cargas negativas devido ao incremento de matéria orgânica, diminuindo as reações de adsorção e aumentando o P disponível (NEGASSA *et al.*, 2008). A redistribuição das formas orgânicas de P, mais móveis no solo e menos susceptíveis às reações de adsorção, é proporcionada pela mineralização lenta e gradual dos resíduos orgânicos. Portanto, a redistribuição de P no perfil do solo, com o tempo de cultivo, tem sido atribuída à decomposição dos resíduos orgânicos depositados na superfície e à decomposição das raízes no solo (ANGHINONI, 2007).

O potássio (K) é absorvido pelas plantas na forma iônica de K^+ , sendo que no sistema plantio direto a dinâmica do K é alterada pelo aumento da CTC e pela sua reciclagem via culturas comerciais e de cobertura do solo. Cerca de 65–75% do K absorvido pelas plantas é proveniente de resíduos de culturas anteriores (MALAVOLTA, 2006). Concomitantemente, os aumentos na CTC e no pH do solo decorrentes da elevação no teor de matéria orgânica e da

aplicação de calcário, respectivamente, aumentam a capacidade do solo em reter K trocável e modificam sua distribuição entre a troca e a solução do solo, reduzindo o seu teor na solução, com a diminuição de perdas por lixiviação. Esse nutriente passa para o solo formando um gradiente decrescente no perfil, a partir da superfície, devido a sua rápida liberação dos resíduos das culturas (ANGHINONI, 2007).

A principal fonte de enxofre (S) para as plantas em sistema plantio direto é a matéria orgânica do solo. Na implantação do sistema, normalmente, há menor disponibilidade do nutriente nas camadas superficiais do solo e maior teor de $S-SO_4^{2-}$ (forma absorvida pelas plantas) em camadas do subsolo (SCHERER, 2001; RHEINHEIMER *et al.*, 2005). Com a estabilização do sistema, a disponibilidade de sulfato aumenta devido a ciclagem da matéria orgânica do solo e dos resíduos dos cultivos (ANGHINONI, 2007).

No caso da disponibilidade dos micronutrientes, a dinâmica é um pouco diferente, pois o aumento da matéria orgânica do solo no sistema plantio direto pode reduzir, ao menos em parte, a disponibilidade de alguns micronutrientes catiônicos pela formação de complexos organometálicos estáveis, especialmente com o cobre (Cu). A calagem superficial pode diminuir a disponibilidade de manganês (Mn), zinco (Zn), ferro (Fe) e Cu, e aumentar a disponibilidade de molibdênio (Mo). Já, o antagonismo $P \times Zn$ é aumentado devido ao aumento no teor de P nas camadas superficiais do solo (ANGHINONI, 2007). O boro (B) é absorvido na forma de ácido bórico (H_3BO_3), enquanto Cu, Fe, Mn e Zn são absorvidos principalmente na forma bivalente (Cu^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+}) (DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

Em condições naturais, o solo apresenta estoques estáveis de C (BRUN, 2008). Porém, quando submetido ao cultivo agrícola, a taxa de perda de C é, geralmente, maior que a de acúmulo. Tal perda de C pode ser acelerada ou não e é dependente do manejo do solo e sua perturbação, degradação da vegetação, fogo, erosão, escassez de nutrientes e déficit hídrico (SOUSSANA; LEMAIRE, 2014).

O C presente no solo pode ser dividido em quatro compartimentos, embora aqueles que podem ser afetados pelo manejo são apenas três: 1) reservatório ativo ou lábil, representado por compostos orgânicos facilmente oxidáveis derivados de fragmentos de vegetais recentes e controlado, principalmente, pela adição de resíduos culturais, pelo clima e pelo manejo do solo; 2) reservatório lentamente oxidável englobando os macroagregados, os quais são controlados pela mineralogia e pelos fatores agronômicos que interferem na agregação, como o manejo do solo; e 3) reservatório muito lentamente oxidável constituído pelos microagregados, sendo um reservatório recalcitrante de alta estabilidade em água, constituído pelo C associado à fração

mineral do solo e controlado pela mineralogia da fração argila, formando complexos organominerais que não são influenciados pelo manejo do solo (DUXBURY *et al.*, 1989).

O caminho do C oriundo dos resíduos vegetais inicia através das frações lábeis em direção às estáveis (TIVET *et al.*, 2013) e depende do tempo de permanência desse C (BAYER *et al.*, 2004). O C considerado não protegido (MIELNICZUK, 1999) compreende a biomassa microbiana e a fração lábil; ele é responsável pela agregação temporária (STURMER *et al.*, 2011) e essa fração é facilmente afetada por perturbações do meio, possui um tempo de residência no solo de 1 a 5 anos e representa cerca de um terço do C orgânico total do solo. O C protegido é aquele associado aos minerais, responsável pela agregação estável e pela grande capacidade de troca de cátions, podendo permanecer no solo por até 100 anos (MIELNICZUK, 1999). Esta fração também está relacionada com a qualidade e a quantidade de resíduos depositados ao solo que são governados pelo clima, portanto, sendo diferente em regiões tropicais e subtropicais (BORTOLUZZI; ELTZ, 2000).

2.5 ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Os sistemas de manejo solo podem interferir na qualidade física do solo. No sistema plantio direto, dependendo do manejo adotado, a ausência de revolvimento do solo pode levar a um adensamento da camada superficial do solo, ocasionar indesejada degradação, afetar o crescimento radicular e a disponibilidade de água, oxigênio e nutrientes e, conseqüentemente, prejudicar a produtividade das culturas (SILVEIRA NETO *et al.*, 2006). Vale ressaltar que os valores de densidade crítica são variáveis de acordo com as características do solo, sendo que há uma relação linear inversa entre a densidade crítica do solo e o teor de argila (REICHERT *et al.*, 2009).

A adequada condução do sistema plantio direto, com rotação diversificada de culturas, alta produção de fitomassa, sistema radicular abundante, profundo e agressivo (descompactação física e biológica), é essencial para melhorar os atributos físicos do solo, seja pelo sistema radicular das culturas e também pelo aporte de matéria orgânica (COSTA *et al.*, 2003; FRANCHINI *et al.*, 2000, 2012; SILVEIRA NETO *et al.*, 2006). A presença de raízes com morfologias diferentes pode alterar a estrutura do solo e, conseqüentemente, o arranjo e o volume de poros (NICOLOSO *et al.*, 2008). Contudo, os benefícios da rotação de culturas sobre a qualidade física do solo são mais perceptíveis em sistemas de cultivo de longa duração (FRANCHINI *et al.*, 2012).

Os resíduos deixados sobre a superfície do solo, além de reduzirem a compactação, também aumentam a agregação das partículas do solo, e essas alterações físicas benéficas, juntamente com as alterações químicas proporcionadas pelo sistema, favorecem o desenvolvimento das plantas, a regulação térmica e a redução da erosão hídrica (COSTA *et al.*, 2015; COUTINHO *et al.*, 2010).

A importância em se utilizar plantas de cobertura com sistema radicular agressivo está concentrada no fato de as raízes serem mais importantes do que a parte aérea para os estoques de C, pois por possuírem maior recalcitrância, mitigam o efeito negativo da compactação e contribuem para a formação de bioporos, bem como para o acúmulo de C orgânico e de nutrientes em profundidade (ANGHINONI, 2007; ALBUQUERQUE *et al.*, 2015; CARVALHO *et al.*, 2022).

2.6 ATIVIDADE BIOLÓGICA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

A adoção de sistemas de manejo conservacionistas, principalmente quando em longo prazo, tem aumentado a complexidade do solo e, assim, alterado os atributos químicos, físicos e biológicos do solo. O emprego de rotação diversificada de culturas, com resíduos de composições diferentes, aumenta a diversidade da macrofauna bem como da biomassa microbiana. A liberação de enzimas por bactérias, fungos micorrízicos arbusculares e nematoides benéficos no solo, acarreta uma série de reações bioquímicas que favorecem a decomposição de resíduos vegetais, a fixação biológica de N₂, a ciclagem e a disponibilização de nutrientes, além da supressão de fitonematoides patogênicos (CARVALHO *et al.*, 2022).

Estudos recentes mostraram que duas enzimas presentes no solo podem ser utilizadas como parâmetros para avaliar a atividade biológica do solo, a arilsulfatase e a β -glicosidase (associadas aos ciclos do S e do C, respectivamente) (MENDES *et al.*, 2020). A arilsulfatase é secretada por microrganismos e também por vegetais através de exsudatos radiculares ou após a morte e a ruptura das células radiculares (TABATABAI; BREMNER, 1970). De acordo com Baligar *et al.* (1988), a atividade da enzima arilsulfatase no solo diminui com a redução no conteúdo de matéria orgânica e o aumento na profundidade do solo.

A enzima β -glicosidase hidrolisa os resíduos da celobiose, atuando no processo final da decomposição da celulose (EIVAZI; TABATABAI, 1988). Portanto, mudanças na atividade dessa enzima podem indicar alterações no acúmulo de matéria orgânica e na qualidade do solo (MENDES *et al.*, 2020).

Dada a crescente atenção à sustentabilidade dos sistemas de produção, a análise da atividade biológica do solo em diferentes sistemas de produção de longa duração sob plantio direto, os quais são de alta complexidade, é de suma importância, visto que a atividade biológica do solo é uma variável sensível às mudanças do meio e é indicadora de qualidade do solo (KHADEM; RAIESI, 2017).

2.7 ROTAÇÃO DE CULTURAS E RENDIMENTO DE GRÃOS

É inevitável que o sistema de manejo que proporcione melhoria nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo também influencie positivamente o rendimento das culturas e a rentabilidade agrícola, principalmente em condições tropicais e subtropicais (CANALLI *et al.*, 2020; FRANCHINI *et al.*, 2012; GARBELINI *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2019). A rotação de culturas, além de colaborar com o rendimento das culturas sucessoras através da maior disponibilidade de nutrientes, colabora também com a menor incidência de pragas doenças. Segundo Stempkowski *et al.* (2019), a incidência de mosaico-comum no trigo é diminuída com utilização de culturas que não hospedem o vírus, como aveia e ervilhaca. A alternância de cultivos torna os sistemas de produção mais robustos, auxiliando na mitigação de fatores externos adversos como o estresse hídrico. Estima-se que as culturas sejam 14% mais resistentes aos estresses abióticos em sistemas de produção mais diversificados (LI *et al.*, 2019; LIN, 2011).

Maior produtividade de soja foi encontrada sobre a palhada das culturas de feijão guandu, tremoço e aveia branca do que no sistema convencional de preparo do solo (CARDOSO *et al.*, 2014). Em Goiás, Fialho (2020) verificou maior rendimento de grãos de soja quando cultivada sobre a palhada de plantas de cobertura de milheto + *Crotalaria spectabilis* + *Urochloa ruziziensis*.

Em um trabalho realizado por Canalli *et al.* (2020) na região Centro-Sul do Paraná, sistemas de produção mais diversificados apresentaram receita bruta 14,5% maior em relação à sucessão trigo-soja. Este mesmo estudo mostrou que a cultura da soja, sob rotação de culturas, obteve produtividade 25% maior do que a média do Estado do Paraná.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar as alterações nos atributos químicos do perfil do solo, na densidade, no estoque de C e N, bem como no rendimento de grãos de soja e milho, e na atividade biológica do solo, em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as alterações na acidez ativa (pH em CaCl_2), no ΔpH (pH em KCl – pH em água), na acidez trocável (Al), na saturação por Al e nos teores de C orgânico, N total, Ca, Mg, K, P, S- SO_4 , B, Fe, Mn, Zn e Cu no perfil do solo (0–200 cm), em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.
- Avaliar as alterações na densidade do solo nas camadas de 0–10 e 10–20 cm de profundidade em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.
- Calcular os estoques de C orgânico total, C oxidável em permanganato de potássio (COXP), C extraído em água quente (CAQ) e N total na camada de solo de 0–20 cm em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.
- Calcular o acúmulo de C proveniente da biomassa e o rendimento de grãos de milho e soja após longo período (31 anos) da adoção de sistemas de produção sob plantio direto.
- Quantificar a atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase na camada de 0–10 cm de profundidade do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.

4 HIPÓTESES

- Sistemas de produção de longa duração com uma maior diversidade de espécies de plantas diminuem a densidade superficial do solo e proporcionam maiores incrementos de C na biomassa, nos conteúdos de C e N, e nos teores de P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes por meio de maior ciclagem de nutrientes, resultando em maiores produtividades das culturas.
- Sistemas de produção de longa duração sob sucessão de culturas de grãos prejudicam a qualidade do solo por proporcionarem maior adensamento do solo e menores incrementos nos conteúdos de C e N, e na disponibilidade de nutrientes, resultando em sistemas menos produtivos com o passar do tempo.

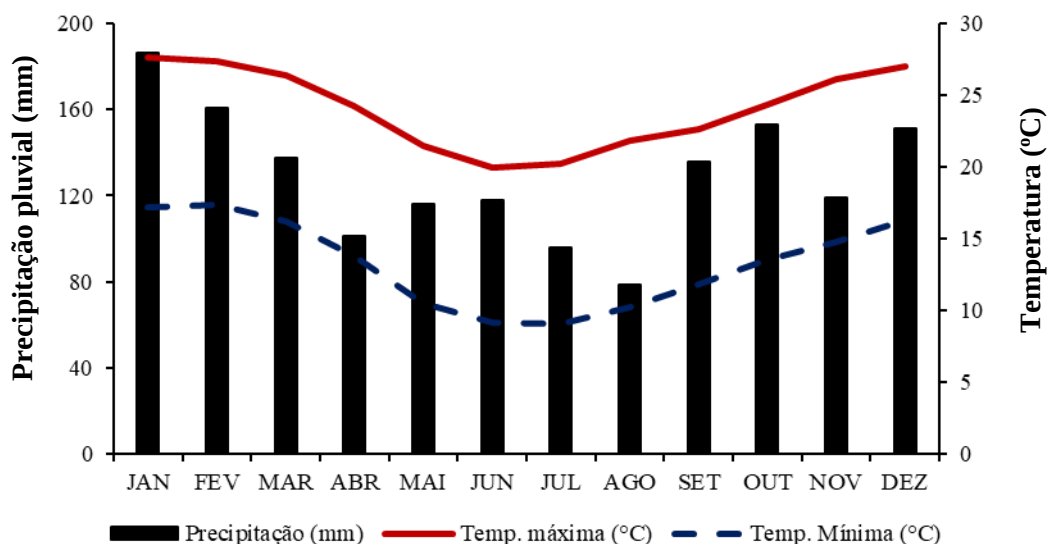
5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 LOCAL DO ESTUDO, CARACTERIZAÇÃO DO SOLO, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

A vegetação original sob campo nativo do local do experimento teve conversão para lavoura em 1967. O arroz (*Oryza sativa* L.) foi cultivado no verão nos três primeiros anos e a área permaneceu em pousio durante o inverno. Nos anos seguintes foram cultivados trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no verão. Em 1981, a área passou a ser manejada sob sistema plantio direto, com cultivo de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) para cobertura no inverno e soja no verão, durante sete anos consecutivos.

O experimento foi instalado sob plantio direto em 1989 no Centro de Experimentação para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária da Fundação ABC, no município Ponta Grossa, PR (25° 00' 35"S e 50° 09' 16" W), numa altitude de 890 m. O clima da região é subtropical úmido mesotérmico do tipo Cfb (Köppen). Os verões são frescos e as geadas são frequentes durante o inverno. A temperatura média no mês mais quente é menor que 24,1°C, a temperatura média do mês mais frio é menor que 13,3°C e a temperatura média anual é de 17,8°C (Figura 1). A precipitação pluvial média anual é de 1554 mm e a média da umidade relativa do ar é de 77,2% (IAPAR, 2023).

Figura 1. Média histórica de precipitação pluvial e de temperatura máxima e mínima na região de Ponta Grossa/PR durante os meses de janeiro a dezembro (IAPAR, 2023).



O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho mesoférico textura argilosa (EMBRAPA, 2013). A declividade do terreno da área experimental é plano suave ondulada (3%) e a distribuição granulométrica ao longo do perfil do solo (0–200 cm) está

apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Distribuição granulométrica da área experimental. Fundação ABC, Ponta Grossa/PR.

Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila
	-----g kg ⁻¹ -----		
0-10	471	81	448
10-20	461	72	467
20-40	416	80	504
40-60	388	78	534
60-80	393	61	546
80-100	380	73	547
100-130	385	56	559
130-160	379	58	563
160-200	375	61	564

O delineamento experimental empregado foi em blocos ao acaso, com seis tratamentos e quatro repetições. O experimento compreendeu seis sistemas produção conduzidos sob plantio direto desde o inverno de 1989, com variação no número e na sequência temporal das espécies de plantas (Tabela 2).

Tabela 2. Identificação e caracterização dos tratamentos (sistemas de culturas) e tipo de rotação em sistema plantio direto durante 31 anos em Latossolo Vermelho mesoférico. Fundação ABC, Ponta Grossa/PR.

Sistema	Espécies vegetais em alternância	Rotação de culturas ²
I	ER ¹ -MI ² -AV ³ -SO ⁴ -TR ⁵ -SO	Triannual
II	AV-MI-TR-SO	Bianual
III	TR-SO	Anual
IV	AZ ⁶ -MI-AZ-SO	Bianual
V	ALF ⁷ -MI	Semiperene
VI	ER-MI-TR-SO	Bianual

¹ER: ervilhaca (*Vicia villosa* Roth); ²MI: milho (*Zea mays* L.); ³AV: aveia (*Avena strigosa* Schreb.); ⁴SO: soja (*Glycine max* (L.) Merr); ⁵TR: Trigo (*Triticum aestivum* L.); ⁶AZ: azevém (*Lolium multiflorum* Lam.); ⁷ALF: alfafa (*Medicago sativa* L.). A cultura da alfafa permaneceu em desenvolvimento num período de 2,5 anos, com sete a oito cortes anuais.

O trigo, o milho e a soja foram cultivados para produção de grãos. A ervilhaca e a aveia foram manejadas como culturas de cobertura, sendo dessecadas antes da semeadura da cultura de verão. A alfafa e o azevém foram cortados e destinados à produção de feno e pré-

secado.

Durante o inverno de 1988, antecedendo a instalação do experimento, 4,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico e 400 kg ha⁻¹ de termofosfato magnésiano (18% de P₂O₅ e 7% de MgO) foram aplicados e incorporados por meio de arado de aiveca à 30 cm de profundidade seguido de duas gradagens à 12 cm de profundidade. A partir da instalação do experimento, em 1989, a calagem foi realizada na superfície de acordo com os resultados de análise de solo, a cada 2-3 anos, e a adubação foi realizada anualmente de acordo com o sistema de produção. Na tabela 3 são mostradas as quantidades de calcário e de nutrientes na adubação aplicadas nos diferentes sistemas de produção durante o período de 1989 a 2020 (31 anos). O sistema ALF-MI recebeu ainda esterco líquido suíno na dose de 110 m³ ha⁻¹ em 1993, esterco de frango equivalente a 14 m³ ha⁻¹, dividido em quatro lotes em 1995, e ainda uma quantidade acumulada de 49 kg ha⁻¹ de Cu e 41 kg ha⁻¹ de B via fertilizantes.

Tabela 3. Quantidades de calcário e de N, P₂O₅, K₂O, S-SO₄²⁻ e Zn²⁺ via fertilizantes adicionadas no solo durante o período de 1989 a 2020 (31 anos) nos diferentes sistemas de produção sob plantio direto de longa duração. Fundação ABC, Ponta Grossa/PR.

Sistema	Calcário	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S-SO ₄ ²⁻	Zn ²⁺
	----- kg ha ⁻¹ -----					
I ¹	15500	3236	3758	3425	335	39
II ²	15100	4519	4016	3382	279	42
III ³	17000	3620	4232	4967	362	11
IV ⁴	17800	5785	4169	5077	357	46
V ⁵	19400	2242	5475	12829	1932	70
VI ⁶	17200	4262	3983	3896	274	38

¹ER-MI-AV-SO-TR-SO; ²AV-MI-TR-SO; ³TR-SO; ⁴AZ-MI-AZ-SO; ⁵ALF-MI; ⁶ER-MI-TR-SO.

5.2 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO

Amostras de solo foram coletadas antes da semeadura das culturas de inverno, em abril de 2021, nas profundidades de 0–10, 10–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100, 100–130, 130–160 e 160–200 cm. Foram coletadas 10 subamostras por parcela para constituir uma amostra composta nas profundidades de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, cinco subamostras por parcela para constituir uma amostra composta nas profundidades de 60–80 e 80–100 cm, e três subamostras por parcela para constituir uma amostra composta nas profundidades de 100–130,

130–160 e 160–200 cm. As amostras de solo foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C e peneiradas em malha de 2 mm para fins de procedimentos analíticos.

5.3 AVALIAÇÕES

5.3.1 Análises Químicas de Solo

As amostras de solo foram submetidas à análise química tendo-se determinado a acidez ativa (pH em CaCl_2 e pH em água), o ΔpH (pH em KCl – pH em água), a acidez trocável (Al), a acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) e os teores de C orgânico total, N total, Ca, Mg, K, P, S-SO_4^{2-} , B, Fe, Mn, Zn e Cu de acordo com os métodos descritos em Pavan *et al.* (1992) e Raij *et al.* (2001). O teor de C lábil dissolvido em água quente (CAQ) foi determinado de acordo com o método descrito por Ghani *et al.* (2003) e o teor de C oxidável em permanganato de potássio (COXP) foi extraído de acordo com a metodologia adaptada de Weil *et al.* (2003).

5.3.2 Densidade do Solo

Amostras indeformadas foram coletadas com estrutura preservada (BLAKE; HARTAGE, 1986), utilizando-se anéis de aço inoxidável com peso e volumes conhecidos, para a determinação da densidade do solo.

5.3.3 Estoque de C orgânico total, N Total, CAQ e COXP

Para o cálculo do estoque do C orgânico total (COT), N total (NT), CAQ e COXP foi utilizada a seguinte equação:

$$\text{Est} = (\text{X} \times \text{Ds})/10$$

onde: Est é o estoque de C ou de N em determinada profundidade, expresso em Mg ha^{-1} ; X é o teor de C, CAQ, COXP ou de N em determinada profundidade, expresso em g kg^{-1} ; Ds é a densidade do solo na profundidade em que se deseja calcular o estoque, expressa em g cm^{-3} . O estoque dos diferentes compartimentos de C (COT, CAQ e COXP) e NT foram estimados para a camada de 0–20 cm de profundidade com base na massa equivalente de solo, conforme reportado por Ellert e Bettany (1995).

5.3.4 Aporte de C pela Biomassa das Culturas e Rendimento de Grãos

O rendimento acumulado de grãos e de biomassa da parte aérea das culturas nos diferentes sistemas de produção foi quantificado para o período de 1989 a 2021. O aporte total de C pela biomassa das culturas (resíduos da parte aérea e de raízes) para cada sistema de produção foi estimado a partir dos dados de produtividade de grãos e de biomassa seca produzida no período por meio da seguinte equação (SÁ *et al.*, 2014):

$$\text{C total da biomassa (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{rendimento de grãos em Mg ha}^{-1} \times \text{relação produtividade de grãos/parte aérea} \times \text{concentração de C na parte aérea em g kg}^{-1}) + (\text{rendimento de grãos em Mg ha}^{-1} \times \text{relação raiz/parte aérea} \times \text{concentração de C na parte aérea em g kg}^{-1})}{1000}$$

A média anual de adição de C em cada sistema de rotação de culturas foi estimado a partir de informações históricas detalhadas sobre (i) rendimento de grãos de culturas comerciais de trigo, soja e milho, (ii) rendimento de matéria seca da parte aérea de plantas de cobertura de ervilhaca e aveia, e (iii) produção de feno de azevém e de forragens de alfafa coletadas desde o início do experimento. As relações produtividade de grãos/parte aérea utilizadas para esse cálculo foram de 1,1 para milho, 0,95 para trigo e 0,89 para soja (Sá *et al.*, 2014). Para aveia preta, ervilhaca, azevém e alfafa, a relação usada foi 1,0, pois para essas culturas não foi avaliada a produtividade de grãos, e sim a produtividade de biomassa seca produzida pela parte aérea. As relações raiz/parte aérea utilizadas para esse cálculo foram de 0,25 para milho, 0,15 para trigo, 0,20 para soja e 0,23 para aveia preta (Sá *et al.*, 2014). No caso das culturas de ervilhaca, azevém e alfafa, as relações raiz/parte aérea utilizadas foram de 0,14, 0,23 e 0,23, respectivamente.

5.3.5 Atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase

Amostras de solo da camada de 0–10 cm de profundidade foram submetidas às análises para quantificação da atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, através dos métodos descritos em Tabatabai (1994).

5.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa SISVAR. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e para valor F significativo ao nível de 5%, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. No caso das análises de solo, a ANOVA foi realizada conforme o esquema de parcelas subdivididas, considerando os tratamentos com os sistemas de produção como parcelas e as profundidades de amostragem como subparcelas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

O pH do solo foi influenciado significativamente pelos tratamentos e profundidades de amostragem (Figura 2A). Na camada de 0–10 cm, o sistema TR-SO apresentou maior valor de pH (5,3) em relação aos outros tratamentos, seguido pelo sistema ALF-MI (5,1) e, depois, pelos sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO (4,8) e AZ-MI-AZ-SO (4,6) que foram estatisticamente iguais. Este último tratamento não diferiu dos sistemas ER-MI-TR-SO (4,6) e AV-MI-TR-SO (4,5), os quais apresentaram os menores valores de pH.

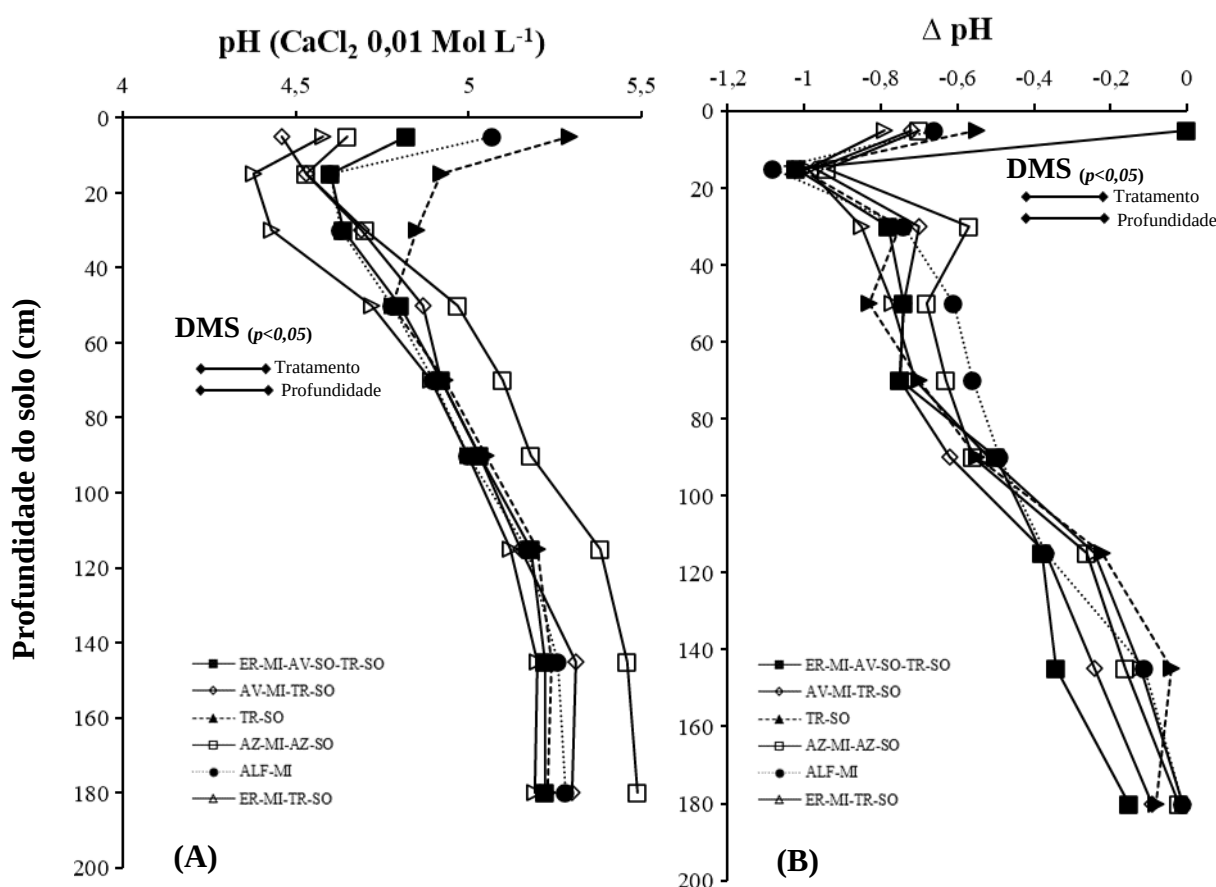
Na camada de 10–20 cm, o comportamento dos tratamentos nos diferentes sistemas de produção foram semelhantes com o da primeira camada analisada; o pH do solo no sistema TR-SO foi estatisticamente maior que nos demais tratamentos (4,9), seguido pelos sistemas ALF-MI (4,6), ER-MI-AV-SO-TR-SO (4,6), AZ-MI-AZ-SO (4,5) e AV-MI-TR-SO (4,5), os foram estatisticamente iguais, e depois pelo sistema ER-MI-TR-SO que teve o pH mais baixo (4,4).

De 20–40 cm de profundidade, os valores de pH do solo nos sistemas TR-SO (4,8), AZ-MI-AZ-SO (4,7) e AV-MI-TR-SO (4,7) foram estatisticamente maiores em relação aos dos demais sistemas, porém, os dois últimos sistemas proporcionaram valores de pH semelhantes aos sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO (4,6) e ALF-MI (4,6); ainda, o sistema ALF-MI proporcionou pH igual ao sistema ER-MI-TR-SO (4,4).

Nota-se nas camadas mais superficiais uma diferença marcante entre os sistemas que incluíram a cultura do milho, os quais apresentaram valores menores de pH, sendo esse fato provavelmente decorrente da adubação nitrogenada feita na cultura do milho. Os fertilizantes nitrogenados amoniacais, bem como a ureia que gera amônio (NH_4^+) no solo, contribuem para o processo de acidificação, pois o N-NH_4^+ se oxida a nitrato (NO_3^-), liberando H^+ no solo (MALAVOLTA, 2006; NASCENTE *et al.*, 2012). Brady e Weil (2013) relataram que o N-NH_4^+ adicionado ao solo, seja por meio de fonte sintética ou orgânica, passa pelo processo de nitrificação microbiana, o qual libera de dois íons H^+ para solução do solo a cada molécula de NH_4^+ transformada em NO_3^- .

A partir de 40 cm de profundidade, os tratamentos começaram a apresentar diferenças menos discrepantes no pH. Os tratamentos AZ-MI-AZ-SO (5,0), AV-MI-TR-SO (4,9), ER-MI-AV-SO-TR-SO (4,8), TR-SO (4,8) e ALF-MI (4,8) apresentaram valores semelhantes de pH na camada de 40–60 cm, mas os valores de pH nos quatro últimos tratamentos também foram iguais ao do tratamento ER-MI-TR-SO (4,7).

Figura 2. Valores de pH (A) e de Δ pH (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



Este mesmo comportamento se repetiu entre os diferentes sistemas na camada de 60–80 cm. Na profundidade de 80–100, não houve diferença estatística entre os tratamentos nos valores de pH do solo. Na camada de 100–130 cm, os sistemas AZ-MI-AZ-SO (5,4), TR-SO (5,2) e ER-MI-AV-SO-TR-SO (5,2) apresentaram maiores valores de pH, e os dois últimos foram estatisticamente iguais aos demais tratamentos (média de 5,1). Na camada de 130–160 cm, o comportamento dos sistemas de produção foi parecido, com os sistemas AZ-MI-AZ-SO (5,5), AV-MI-TR-SO (5,3) e ALF-MI (5,3) apresentando maiores valores de pH, e os dois últimos sistemas apresentando valores de pH estatisticamente iguais aos demais (5,2).

Na última camada coletada de 160–200 cm, os sistemas AZ-MI-AZ-SO (5,5) e AV-MI-TR-SO (5,3) diferiram estatisticamente com as maiores médias de pH do solo, mas o pH do último sistema também foi estatisticamente igual ao dos demais sistemas (5,2). A calagem em sistema plantio direto é feita na superfície do solo, sem incorporação, o que resulta em um gradiente de correção a partir da superfície em direção ao subsolo (CAIRES *et al.*, 2008). Porém, neste sistema, os ácidos orgânicos provenientes da decomposição da palhada das plantas, junto com a calagem superficial, podem aumentar a mobilidade dos produtos originados da dissolução do calcário no perfil do solo, proporcionando melhoria da acidez em subsuperfície (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Houve interação significativa entre os tratamentos e a profundidade de amostragem do solo nos valores de ΔpH (Figura 2B). Na profundidade de 0–10 cm, os sistemas ER-MI-TR-SO (-0,79), AV-MI-TR-SO (-0,72), AZ-MI-AZ-SO (-0,70), ER-MI-AV-SO-TR-SO (-0,69) e ALF-MI (-0,67) foram os que apresentaram maior densidade de cargas elétricas negativas no solo; porém, os valores de ΔpH nos quatro últimos não foram diferentes do sistema TR-SO (-0,55). Na profundidade de 10–20 cm, não houve diferença estatística entre os tratamentos nos valores de ΔpH .

Na profundidade de 20–40 cm, os sistemas ER-MI-TR-SO (-0,85), ER-MI-EV-SO-TR-SO (-0,78), TR-SO (-0,75), ALF-MI (-0,74) e AV-MI-TR-SO (-0,70) apresentaram valores de ΔpH significativamente mais baixos, mas os valores de ΔpH dos três últimos sistemas foram estatisticamente iguais ao do sistema AZ-MI-AZ-SO (-0,57). Na profundidade de 40–60 cm, os sistemas TR-SO (-0,83), ER-MI-TR-SO (-0,77), AV-MI-TR-SO (-0,74), ER-MI-AV-SO-TR-SO (-0,74) e AZ-MI-AZ-SO (-0,68) foram os que apresentaram maior densidade de cargas elétricas negativas no solo, sendo que os valores de ΔpH nos quatro últimos sistemas foram estatisticamente iguais ao do sistema ALF-MI (-0,61).

Na profundidade de 60–80 cm, os sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO (-0,75), AV-MI-TR-SO (-0,75), ER-MI-TR-SO (-0,71), TR-SO (-0,70) e AZ-MI-AZ-SO (-0,63) foram os que apresentaram maior densidade de cargas elétricas negativas no solo, sendo que os valores de ΔpH nos quatro últimos sistemas também foram estatisticamente iguais ao sistema ALF-MI (-0,56). Na profundidade de 80–100 cm não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos nos valores de ΔpH . Na profundidade de 130–160 cm, os sistemas com ER-MI-AV-SO-TR-SO (-0,34), AV-MI-TR-SO (-0,24) e AZ-MI-AZ-SO (-0,16) diferiram dos demais com maior densidade de cargas elétricas negativas no solo, sendo os valores de ΔpH dos dois últimos sistemas estatisticamente iguais aos dos sistemas ER-MI-TR-SO (-0,12) e ALF-MI (-

0,11), e por fim, os valores ΔpH dos três últimos sistemas citados foram estatisticamente iguais ao do sistema TR-SO (-0,04).

Na última camada de solo avaliada de 160–200 cm, os sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO (-0,15), AV-MI-TR-SO (-0,09), AZ-MI-AZ-SO (-0,02), ALF-MI (-0,01) e ER-MI-TR-SO (-0,01) apresentaram maiores valores de ΔpH que os demais, porém os valores de ΔpH nos quatro últimos sistemas foram estatisticamente iguais ao do sistema TR-SO (0,08). Em regiões de clima tropical e subtropical, o humus da matéria orgânica é o principal colóide responsável pela CTC do solo (de 70 a 90% das cargas negativas). A matéria orgânica ocasiona maior retenção de cátions no solo, especialmente dos nutrientes utilizados nas fertilizações, influencia na ciclagem de nutrientes e o seu acúmulo deve ser almejado em todos os sistemas conservacionistas (GONÇALVES *et al.*, 2019).

A acidez trocável do solo (Al^{3+}) foi influenciada significativamente pela interação dos sistemas de produção e as profundidades de amostragem (Figura 3A). Os sistemas diferiram entre si somente nas camadas mais superficiais do perfil do solo, de 0–40 cm, sendo que nas profundidades de 40 a 200 cm não houve interação significativa dos tratamentos no teor de Al^{3+} . Na camada de 0–10 cm, os maiores teores de Al^{3+} no solo foram observados nos sistemas AZ-MI-AZ-SO (3,3 mmol_c dm⁻³), ER-MI-TR-SO (3,1 mmol_c dm⁻³) e AV-MI-TR-SO (2,7 mmol_c dm⁻³); os demais sistemas apresentaram teores de Al^{3+} menores e estatisticamente iguais entre si.

Na camada de 10–20 cm, o tratamento ER-MI-TR-SO diferiu dos demais apresentando teor mais alto de Al^{3+} no solo (5,2 mmol_c dm⁻³), sendo que os tratamentos AV-MI-TR-SO (1,7 mmol_c dm⁻³), TR-SO (1,7 mmol_c dm⁻³), AZ-MI-AZ-SO (1,3 mmol_c dm⁻³) e ER-MI-AV-SO-TR-SO (1,1 mmol_c dm⁻³) apresentaram teores menores e estatisticamente iguais. Na profundidade de 20–40 cm, o comportamento se repetiu, com o sistema ER-MI-TR-SO apresentando teor mais alto de Al^{3+} no solo, e os sistemas AV-MI-TR-SO, TR-SO, AZ-MI-AZ-SO e ER-MI-AV-SO-TR-SO com teores significativamente menores.

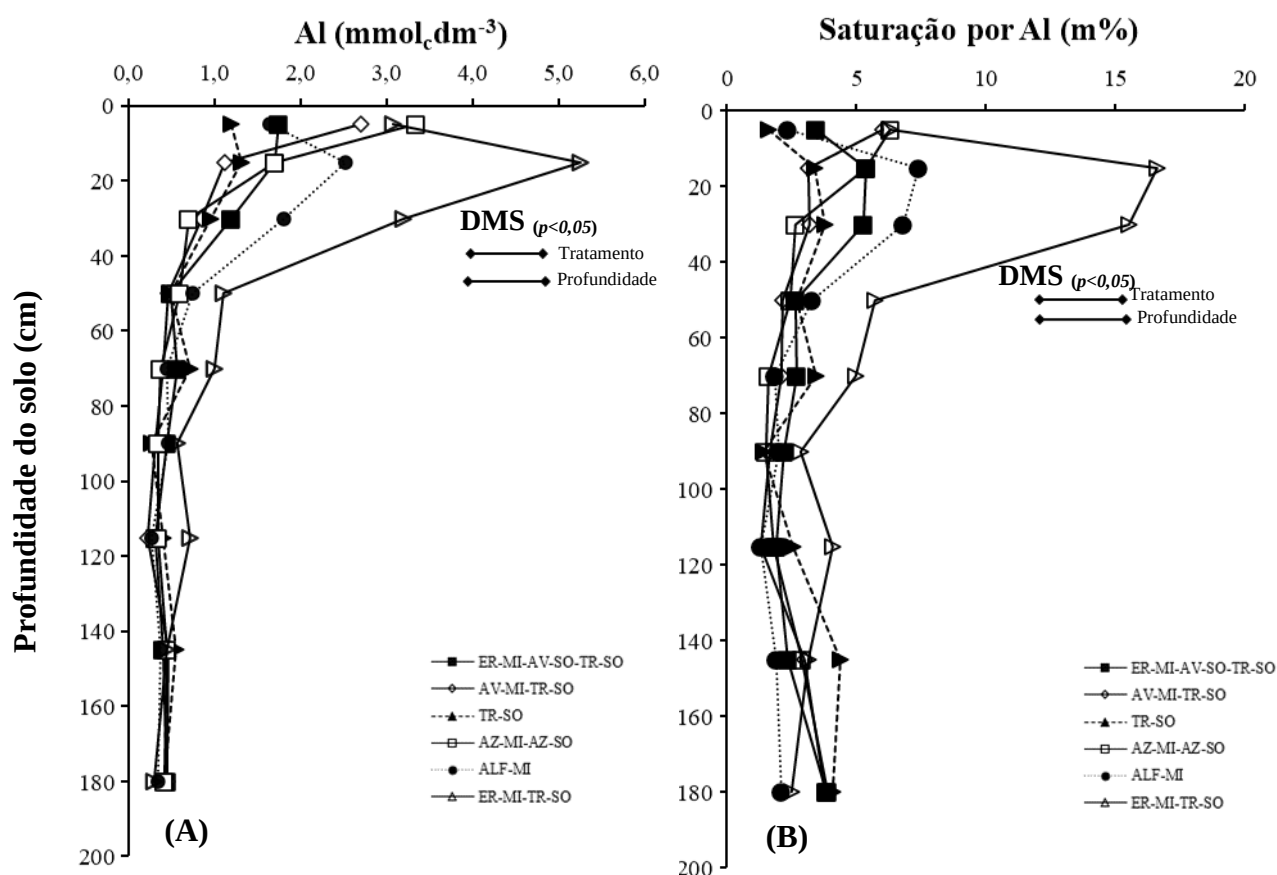
No sistema plantio direto, os efeitos da acidificação do solo podem ser amenizados por conta da complexação do Al pela matéria orgânica do solo. O acúmulo de matéria orgânica promove menor atividade iônica do Al^{3+} que pode ser complexado pelo C orgânico dissolvido na solução do solo, diminuindo sua toxicidade para as plantas (FRANCHINI *et al.*, 1999; SANTOS *et al.*, 2011).

Para a saturação por Al^{3+} no solo, houve interação dos tratamentos com as profundidades de amostragem (Figura 3B). Na camada de 0-10 cm de profundidade os sistemas AZ-MI-AZ-SO (6,3%), ER-MI-TR-SO (6,3%), AV-MI-TR-SO (6,0%) e ER-MI-AV-SO-TR-

SO (3,5%) apresentaram valores significativamente maiores de saturação por Al^{3+} em relação aos demais sistemas, mas o último sistema também não diferiu dos sistemas ALF-MI (2,4%) e TR-SO (1,6%), com os menores valores de saturação por Al^{3+} . Na camada de 10–20 cm de profundidade, o sistema bianual ER-MI-TR-SO (16,6%) apresentou valor significativamente maior aos demais sistemas, seguido por ALF-MI (7,4%), AZ-MI-AZ-SO (5,4%) e ER-MI-AV-SO-TR-SO (5,4%), mas os dois últimos também foram semelhantes a TR-SO (3,4%) e AV-MI-TR-SO (3,2%). A camada de 20–40 cm seguiu o mesmo padrão da camada de 10–20 cm.

Nas camadas de 40–60 e 60–80 cm de profundidade, o padrão de resposta foi o mesmo, sendo que os sistemas ER-MI-TR-SO (~5,3%), TR-SO (~3,1%), ER-MI-AV-SO-TR-SO (~2,7%) e ALF-MI (~2,6%) se destacaram com os maiores valores de saturação por Al^{3+} . De 80–200 cm de profundidade não houve diferença significativa na saturação por Al^{3+} entre os sistemas de produção.

Figura 3. Teores de Al^{3+} trocável (A) e valores de saturação por Al^{3+} (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



O teor de Ca^{2+} trocável no solo foi influenciado significativamente pela interação dos sistemas de produção e profundidade de amostragem (Figura 4A). Os tratamentos diferiram

estatisticamente quanto ao teor de Ca^{2+} de forma predominante nas camadas mais superficiais do solo. Na camada de 0–10 cm, o maior teor significativo de Ca^{2+} trocável foi obtido no sistema semiperene ALF-MI ($50,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), seguido pelos sistemas TR-SO ($43,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), ER-MI-AV-SO-TR-SO ($33,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), AZ-MI-AZ-SO ($33,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e ER-MI-TR-SO ($31,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), os quais apresentaram teores de Ca^{2+} estatisticamente iguais, sendo que este último não diferiu do sistema AV-MI-TR-SO ($28,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), o qual apresentou o menor teor de Ca^{2+} trocável entre os sistemas estudados.

Na camada de 10–20 cm, o sistema TR-SO diferiu estatisticamente dos demais tratamentos apresentando maior teor de Ca^{2+} ($26,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), enquanto os tratamentos AZ-MI-AZ-SO ($18,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e ER-MI-TR-SO ($15,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) apresentaram teores menores de Ca^{2+} trocável no solo. Na camada de 20–40 cm, os sistemas ER-MI-TR-SO ($10,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e ER-MI-AV-SO-TR-SO ($13,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foram os que apresentaram os menores teores de Ca^{2+} trocável; porém o teor de Ca^{2+} no sistema ER-MI-AV-SO-TR-SO não diferiu estatisticamente dos teores nos demais sistemas que tiveram média de $15,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Na profundidade de 40–60 cm, os sistemas AZ-MI-AZ-SO e AV-MI-TR-SO apresentaram os maiores teores de Ca^{2+} trocável ($15,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $13,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), sendo que este último tratamento proporcionou teor de Ca^{2+} estatisticamente igual ao dos demais tratamentos. Na profundidade de 60–80 cm, o teor de Ca^{2+} foi significativamente maior nos sistemas AZ-MI-AZ-SO ($14,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), ALF-MI ($13,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), ER-MI-AV-SO-TR-SO ($12,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), TR-SO ($11,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e AV-MI-TR-SO ($11,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), mas os teores de Ca^{2+} nos quatro últimos não diferiram do teor encontrado no sistema ER-MI-TR-SO ($10,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Na profundidade de 130–160 cm, o teor de Ca^{2+} trocável foi significativamente maior nos sistemas ALF-MI ($10,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), ER-MI-AV-SO-TR-SO ($8,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), AV-MI-TR-SO ($7,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), ER-MI-TR-SO ($7,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e AZ-MI-AZ-SO ($6,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), mas os teores de Ca^{2+} nos quatro últimos foram semelhantes ao do sistema TR-SO ($6,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os teores de Ca^{2+} trocável não diferiram significativamente entre os diferentes sistemas de produção nas profundidades de 80–100, 100–130 e 160–200 cm.

O teor de Mg^{2+} trocável no solo foi significativamente influenciado pela interação dos sistemas de produção e profundidade de amostragem e houve diferença entre os tratamentos em quase todas as profundidades avaliadas (Figura 4B). Na camada de 0–10 cm foi observado maior teor de Mg^{2+} no sistema TR-SO ($23,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), seguido pelo sistema AZ-MI-AZ-MI ($13,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); os demais tratamentos apresentaram teores de Mg^{2+} no solo estatisticamente iguais e menores.

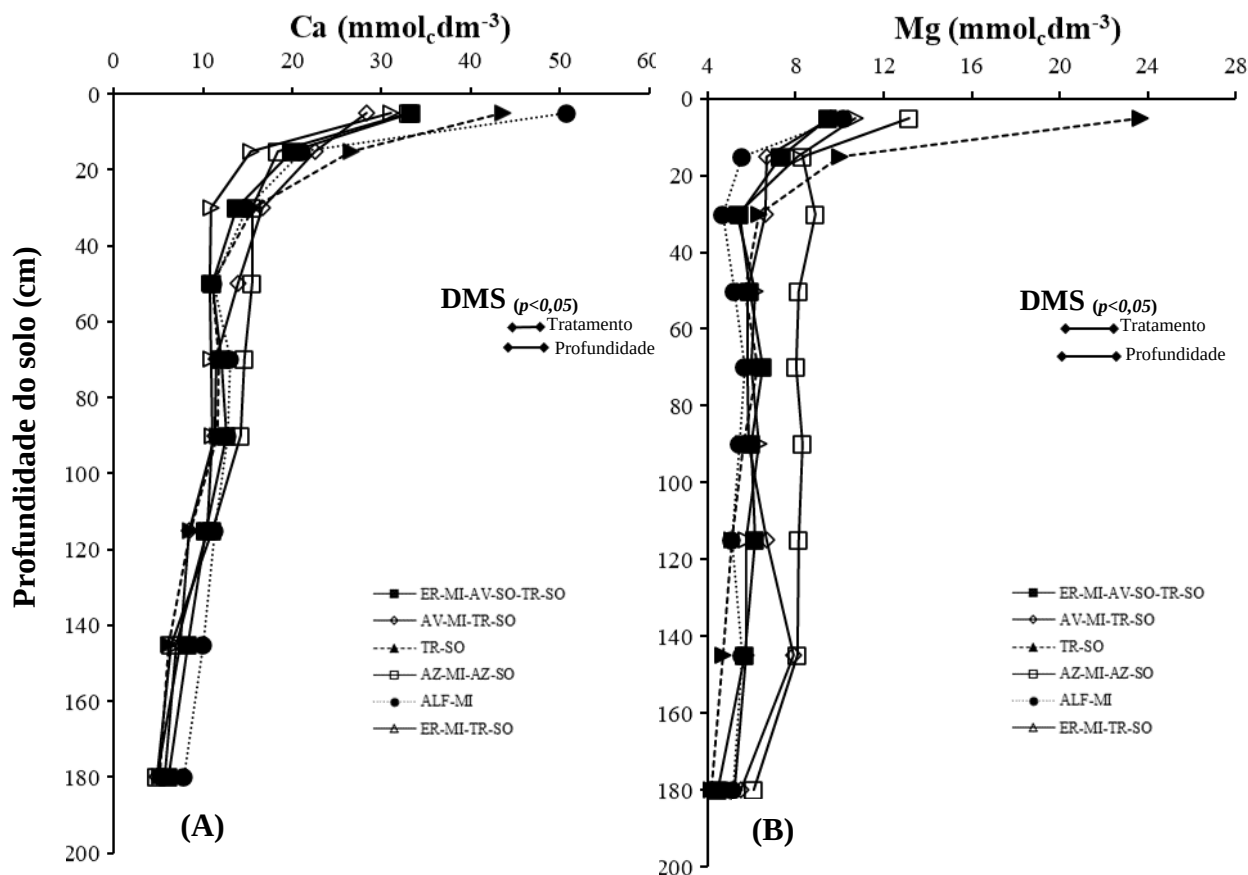
Na camada de 10–20 cm, o sistema TR-SO (10,0 mmol_c dm⁻³) também apresentou maior teor de Mg²⁺ trocável, mas o mesmo não diferiu dos sistemas AZ-MI-AZ-SO e ER-MI-TR-SO, e nestes dois últimos também não foram diferentes dos teores encontrados nos sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO e AV-MI-TR-SO; o sistema ALF-MI apresentou o menor teor de Mg²⁺ nesta profundidade (5,6 mmol_c dm⁻³). Na camada de 20–40 cm, os sistemas AZ-MI-AZ-SO (8,9 mmol_c dm⁻³) e AV-MI-TR-SO (6,6 mmol_c dm⁻³) apresentaram os maiores teores de Mg²⁺ trocável, mas o teor encontrado no sistema AV-MI-TR-SO foi igual ao dos demais tratamentos com menor média.

Na camada de 40–60 cm, os teores de Mg²⁺ foram estatisticamente maiores nos tratamentos AZ-MI-AZ-SO, ER-MI-TR-SO, ER-MI-AV-SO-TR-SO e AV-MI-TR-SO, mas os teores dos três últimos tratamentos foram estatisticamente iguais ao dos demais, sendo que na camada de 100–130 cm o comportamento do Mg²⁺ nesses sistemas se repetiu. Na profundidade de 80–100 cm, os tratamentos AZ-MI-AZ-SO (8,3 mmol_c dm⁻³), ER-MI-TR-SO (6,3 mmol_c dm⁻³) e ER-MI-AV-SO-TR-SO (6,0 mmol_c dm⁻³) continuaram diferindo estatisticamente com os maiores teores de Mg²⁺ trocável no solo. De 130–160 cm de profundidade, os sistemas AZ-MI-AZ-SO (8,1 mmol_c dm⁻³), ER-MI-TR-SO (7,9 mmol_c dm⁻³), ER-MI-AV-SO-TR-SO (5,7 mmol_c dm⁻³) e AV-MI-TR-SO (5,7 mmol_c dm⁻³) apresentaram teores de Mg²⁺ estatisticamente maiores, mas os teores de Mg²⁺ nos sistemas ER-MI-TR-SO, ER-MI-AV-SO-TR-SO e AV-MI-TR-SO também foram iguais ao do sistema ALF-MI (5,6 mmol_c dm⁻³); o menor teor de Mg²⁺ nesta profundidade foi encontrado no sistema TR-SO (4,7 mmol_c dm⁻³). Nas profundidades de 60–80 e 160–200 cm, os teores de Mg²⁺ trocável não foram influenciados significativamente pelos tratamentos.

Os menores teores de Mg²⁺ trocável, principalmente nas camadas mais superficiais do solo, foram encontrados nos sistemas que incluíram milho na rotação e receberam maiores quantidades de N na adubação. A adubação nitrogenada certamente contribuiu para a acidificação do solo e, provavelmente, proporcionou maior redução nos teores de Mg²⁺ no solo, conforme relatado por Malavolta (2006).

Diferentemente do que foi observado nesse estudo, Froio (2022) obteve aumento significativo no teor de Mg²⁺ na camada superficial do solo (0–10 cm) em um sistema com pastagem perene de gramíneas, fato que foi atribuído à maior deposição de dejetos animais, devido ao maior tempo de pastejo na área e à maior produtividade de massa radicular, que após decomposição auxilia na ciclagem de nutrientes no solo.

Figura 4. Teores de Al^{3+} trocável (A) e valores de saturação por Al^{3+} (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



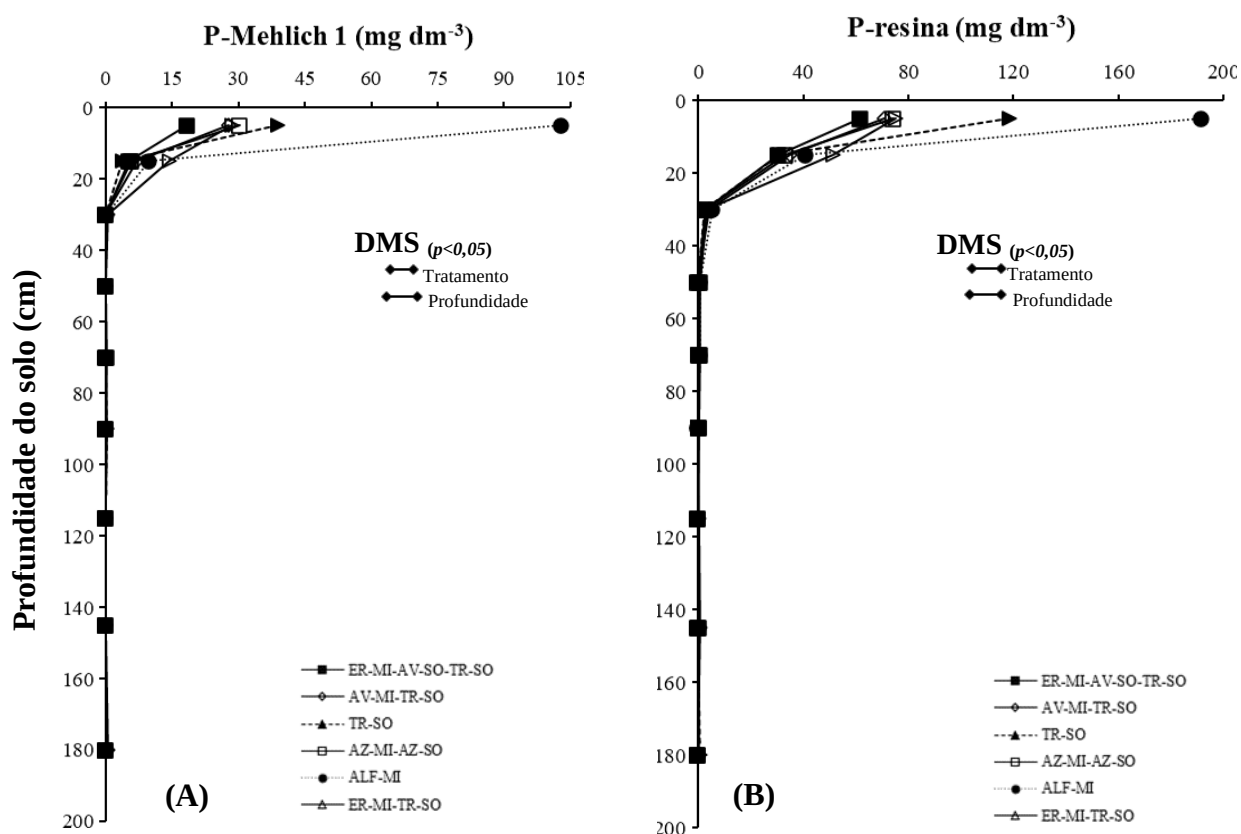
Os teores de P no solo extraídos pela solução de Mehlich 1 (Figura 5A) e pela resina de troca aniônica (Figura 5B) foram influenciados significativamente pelos tratamentos nas camadas superficiais do solo. Na camada de 0–10 cm, o teor de P (Mehlich 1) no tratamento ALF-MI (102,9 mg dm⁻³) foi significativamente maior que o observado nos demais tratamentos, seguido pela sucessão TR-SO (38,8), e pelos sistemas AZ-MI-AZ-SO (30,4), ER-MI-TR-SO (28,5) e AV-MI-TR-SO (27,7), cujos teores de P foram significativamente iguais entre si; o sistema ER-MI-AV-SO-TR-SO (18,5 mg dm⁻³) foi o que apresentou o menor teor de P no solo.

Na camada de 10–20, os tratamentos ER-MI-TR-SO (14,4 mg dm⁻³) e ALF-MI (9,8 mg dm⁻³) foram os que apresentaram os maiores teores de P (Mehlich 1), porém o teor de P no tratamento ALF-MI não diferiu do encontrado nos demais sistemas com menores teores de P. Os teores de P (resina) foram maiores do que os extraídos com Mehlich 1, porém o comportamento do P no solo em função dos sistemas de produção pelos dois extratores foi muito semelhante.

Pelo fato de o P ser um nutriente imóvel no solo, ele se concentra na camada superficial com poucas alterações nas camadas mais profundas (FAGERIA, 2009). A mais alta

concentração de P no sistema ALF-MI pode ser atribuída à adubação frequente com fontes de P feita nesse sistema (Tabela 3), além da ciclagem de nutrientes principalmente pela leguminosa que apresenta baixa relação C:N (THOMAS; ASAKAWA, 1993). Rodrigues *et al.* (2021) relataram aumento na ciclagem de P e, conseqüentemente, de até 20% na fração lábil de P nos primeiros 10 cm de solo no Cerrado com a utilização de culturas e cobertura (braquiária) em sistema plantio direto. Costa *et al.* (2013) relataram aumento do P disponível na camada superficial do solo em sistema de integração agricultura-pecuária sob plantio direto (aveia/azevém-soja) no Rio Grande do Sul.

Figura 5. Teores de P extraídos com solução de Mehlich-1 (A) e resina de troca aniônica (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



Os teores de K^+ trocável no solo foram alterados significativamente em função dos diferentes sistemas de produção (Figura 6A). Na camada de 0–10 cm, o sistema ALF-MI foi o que proporcionou o teor de K^+ estatisticamente mais alto ($6,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em relação aos demais sistemas, seguido pelos sistemas AV-MI-TR-SO ($4,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e ER-MI-TR-SO ($3,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sendo que neste último o teor de K^+ não diferiu dos sistemas ER-MI-AV-

SO-TR-SO ($3,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e TR-SO ($3,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); o sistema AZ-MI-AZ-SO foi o que proporcionou o menor teor de K^+ trocável ($2,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Esse padrão de resposta se manteve nas demais camadas de solo, com maior teor de K^+ sendo encontrado no sistema ALF-MI e menor teor de K^+ no sistema AZ-MI-AZ-SO nas camadas de 10–20 (ALF-MI $4,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e AZ-MI-AZ-SO $2,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), 20–40 (ALF-MI $5,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e AZ-MI-AZ-SO $0,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), 40–60 (ALF-MI $5,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e AZ-MI-AZ-SO $0,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), 60–80 (ALF-MI $4,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e AZ-MI-AZ-SO $0,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), 80–100 (ALF-MI $4,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e AZ-MI-AZ-SO $0,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), 100–130 (ALF-MI $3,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e AZ-MI-AZ-SO $0,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), 130–160 (ALF-MI $4,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e AZ-MI-AZ-SO $0,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e 160–200 cm (ALF-MI $3,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e AZ-MI-AZ-SO $0,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Os mais altos teores de K^+ no sistema ALF-MI pode ser atribuído às pesadas adubações feitas com KCl nesse sistema, sendo que o mesmo recebeu cerca do dobro de K_2O em relação ao sistema AZ-MI-AZ-SO (Tabela 3). A ocorrência de mais altos teores de K^+ em todo o perfil do solo no sistema ALF-MI se deve à mobilidade deste nutriente no solo, o qual se movimentou para as camadas mais profundas do perfil do solo (CRUSCIOL *et al.*, 2010).

Maiores teores de K^+ no solo em sistemas cultivados com milho já eram esperados, visto que o milho possui sistema radicular profundo e alta capacidade de extração, acumulação e reciclagem de K (CARPIM *et al.*, 2008; CRUSCIOL *et al.*, 2010; NASCENTE *et al.*, 2013). Já, rotações de culturas que incluem a cultura da soja apresentam menores teores de K^+ no solo, visto que para cada 1000 kg de grãos produzidos, são exportados cerca de 20 kg de K_2O (FOLONI ; ROSOLEM, 2008).

Os teores de S-SO_4 no solo foram influenciados significativamente pela interação dos tratamentos e profundidades de amostragem (Figura 6B). Porque o sulfato apresenta alta mobilidade no solo, não houve diferença significativa entre os tratamentos para o teor de S-SO_4 nas camadas superficiais de 0–10 e 10–20 cm. Já, na camada de 20–40 cm, o sistema semiperene ALF-MI apresentou teor significativamente maior ($89,8 \text{ mg dm}^{-3}$) que os demais tratamentos, seguido pelos sistemas ER-MI-TR-SO ($55,6 \text{ mg dm}^{-3}$), TR-SO ($42,1 \text{ mg dm}^{-3}$) e ER-MI-AV-SO-TR-SO ($41,2 \text{ mg dm}^{-3}$), os quais apresentaram teores semelhantes entre si, sendo que os dois últimos também foram significativamente iguais aos das menores médias [AV-MI-TR-SO ($26,1 \text{ mg dm}^{-3}$) e AZ-MI-AZ-SO ($23,2 \text{ mg dm}^{-3}$)].

Na camada de 40–60 cm, o sistema ALF-MI manteve o teor de S-SO_4 mais alto no solo ($149,8 \text{ mg dm}^{-3}$), seguido pelos sistemas TR-SO ($84,1 \text{ mg dm}^{-3}$), ER-MI-TR-SO ($69,5 \text{ mg dm}^{-3}$) e ER-MI-AV-SO-TR-SO ($63,9 \text{ mg dm}^{-3}$), os quais foram semelhantes entre si, sendo o

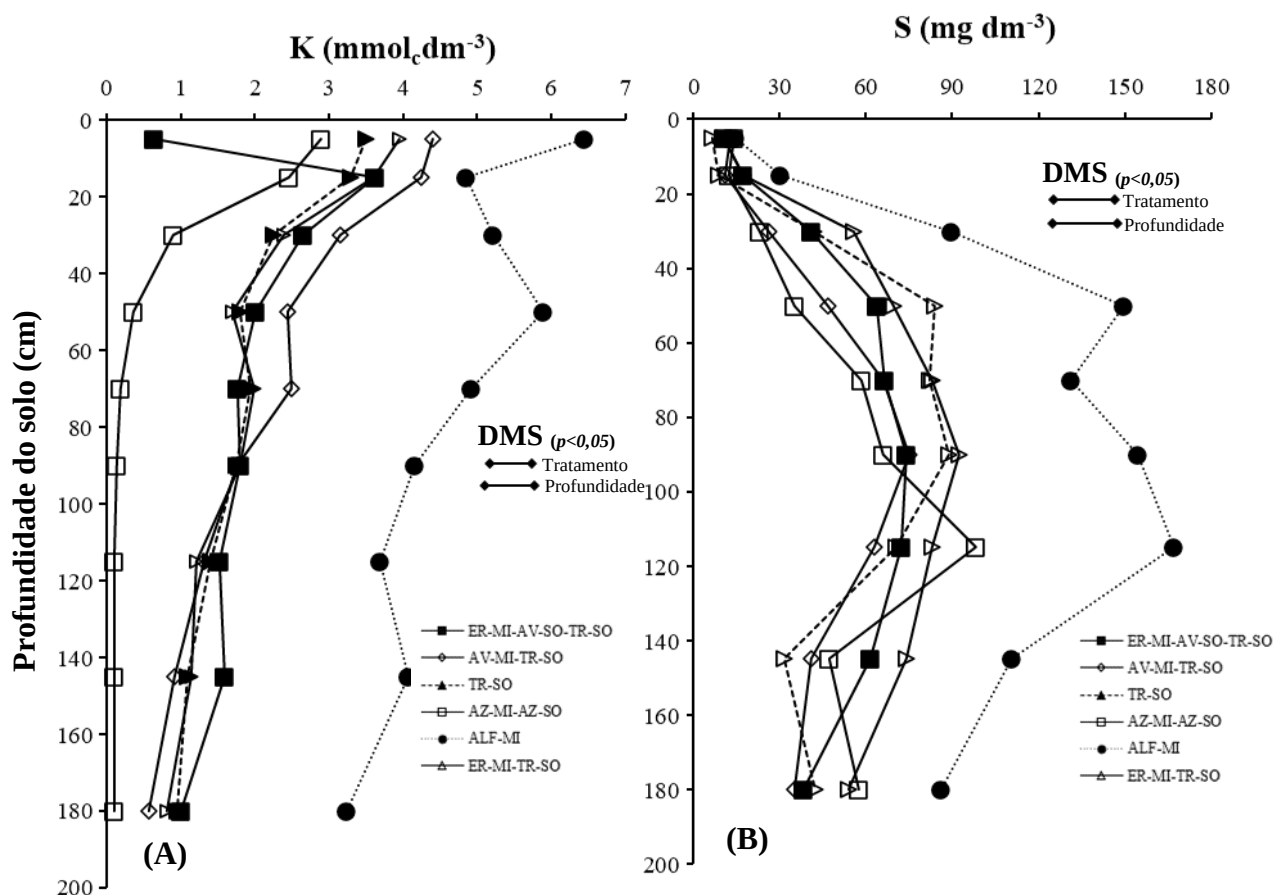
teor de $S-SO_4$ neste último sistema estatisticamente igual ao teor encontrado com AV-MI-TR-SO ($46,8 \text{ mg dm}^{-3}$). Ainda na camada de 40–60 cm, o teor de $S-SO_4$ no sistema AV-MI-TR-SO foi muito semelhante ao observado no sistema AZ-MI-AZ-SO ($35,1 \text{ mg dm}^{-3}$).

Na camada de 60–80 cm, o sistema ALF-MI apresentou teor de $S-SO_4$ maior ($131,2 \text{ mg dm}^{-3}$) que os demais tratamentos, seguido pelos sistemas ER-MI-TR-SO ($82,9 \text{ mg dm}^{-3}$), TR-SO ($82,0 \text{ mg dm}^{-3}$), ER-MI-AV-SO-TR-SO ($66,6 \text{ mg dm}^{-3}$) e AV-MI-TR-SO ($65,9 \text{ mg dm}^{-3}$), os quais apresentaram teores semelhantes entre si, e os teores destes dois últimos não diferiram do encontrado no sistema AZ-MI-AZ-SO ($58,5 \text{ mg dm}^{-3}$).

Na camada de 80–100 cm, o comportamento de resposta foi a mesmo, com o sistema ALF-MI apresentando o maior teor de $S-SO_4$ no solo ($154,7 \text{ mg dm}^{-3}$). De 100–130 cm de profundidade, o sistema ALF-MI manteve o maior teor de $S-SO_4$ ($167,2 \text{ mg dm}^{-3}$) em relação aos demais tratamentos, seguido pelos sistemas AZ-MI-AZ-SO ($98,3 \text{ mg dm}^{-3}$) e ER-MI-TR-SO ($83,2 \text{ mg dm}^{-3}$), os quais apresentaram teores semelhantes entre si, sendo o teor encontrado neste último estatisticamente igual ao dos demais sistemas [ER-MI-AV-SO-TR-SO ($72,2 \text{ mg dm}^{-3}$), TR-SO ($70,5 \text{ mg dm}^{-3}$) e AV-MI-TR-SO ($63,0 \text{ mg dm}^{-3}$)].

Na camada de 130–160 cm, o teor de $S-SO_4$ no sistema ALF-MI ($110,7 \text{ mg dm}^{-3}$) foi maior que o dos demais tratamentos, seguido pelos sistemas ER-MI-TR-SO ($74,2 \text{ mg dm}^{-3}$) e ER-MI-AV-SO-TR-SO ($61,6 \text{ mg dm}^{-3}$), os quais apresentaram teores semelhantes entre si, sendo o teor do último também igual ao dos sistemas AZ-MI-AZ-SO ($47,5 \text{ mg dm}^{-3}$) e AV-MI-TR-SO ($40,9 \text{ mg dm}^{-3}$); ainda, os teores dos dois últimos tratamentos foram iguais ao da sucessão TR-SO ($31,4 \text{ mg dm}^{-3}$) que apresentou o menor teor de $S-SO_4$ no solo. Na camada de solo mais profunda de 160–200 cm, o sistema semiperene ALF-MI apresentou teor de $S-SO_4$ significativamente maior ($86,2 \text{ mg dm}^{-3}$) que o dos demais sistemas, os quais tiveram teores semelhantes entre si, com média de $45,5 \text{ mg dm}^{-3}$. O comportamento do $S-SO_4$ foi oposto ao do P, pois devido a sua grande mobilidade no solo e à boa drenagem dos Latossolos (SCHOENAU; MALHI, 2015), houve distribuição do S até 200 cm de profundidade.

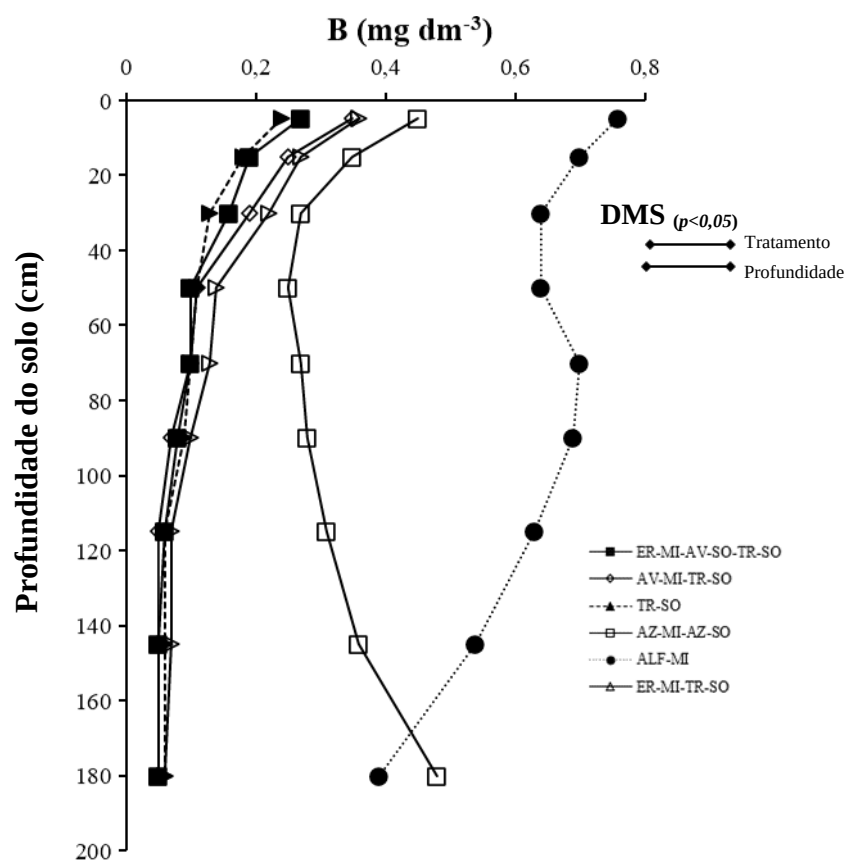
Figura 6. Teores de potássio (A) e enxofre (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



Em quase todas as camadas de solo analisadas houve alteração no teor B no solo em função dos tratamentos (Figura 7). Até a profundidade de 160 cm, o sistema ALF-MI apresentou maior teor de B em comparação aos demais sistemas. Na camada de 160–200 cm, os sistemas AZ-MI-AZ-SO e ALF-MI apresentaram teores de B significativamente superior ($0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ e $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente) aos demais tratamentos.

Os menores teores de B no solo foram encontrados nos sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO, AV-MI-TR-SO, TR-SO e ER-MI-TR-SO em quase todas as profundidades, exceto na camada de 0–10 cm que o sistema ER-MI-TR-SO apresentou teor de B maior que o três primeiros. Por causa da alta mobilidade do B no solo (DECHEN; NACHTIGALL, 2007), a sua distribuição no perfil do solo no sistema ALF-MI se deve à adubação com fontes de B feitas periodicamente nesse sistema (Tabela 3). Além disso, leguminosas como a alfafa, armazenam B (MARSCHNER, 2012) em seus tecidos e, conseqüentemente, fazem a reciclagem deste nutriente com maior eficiência no sistema.

Figura 7. Teores de B em diferentes profundidades no solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.

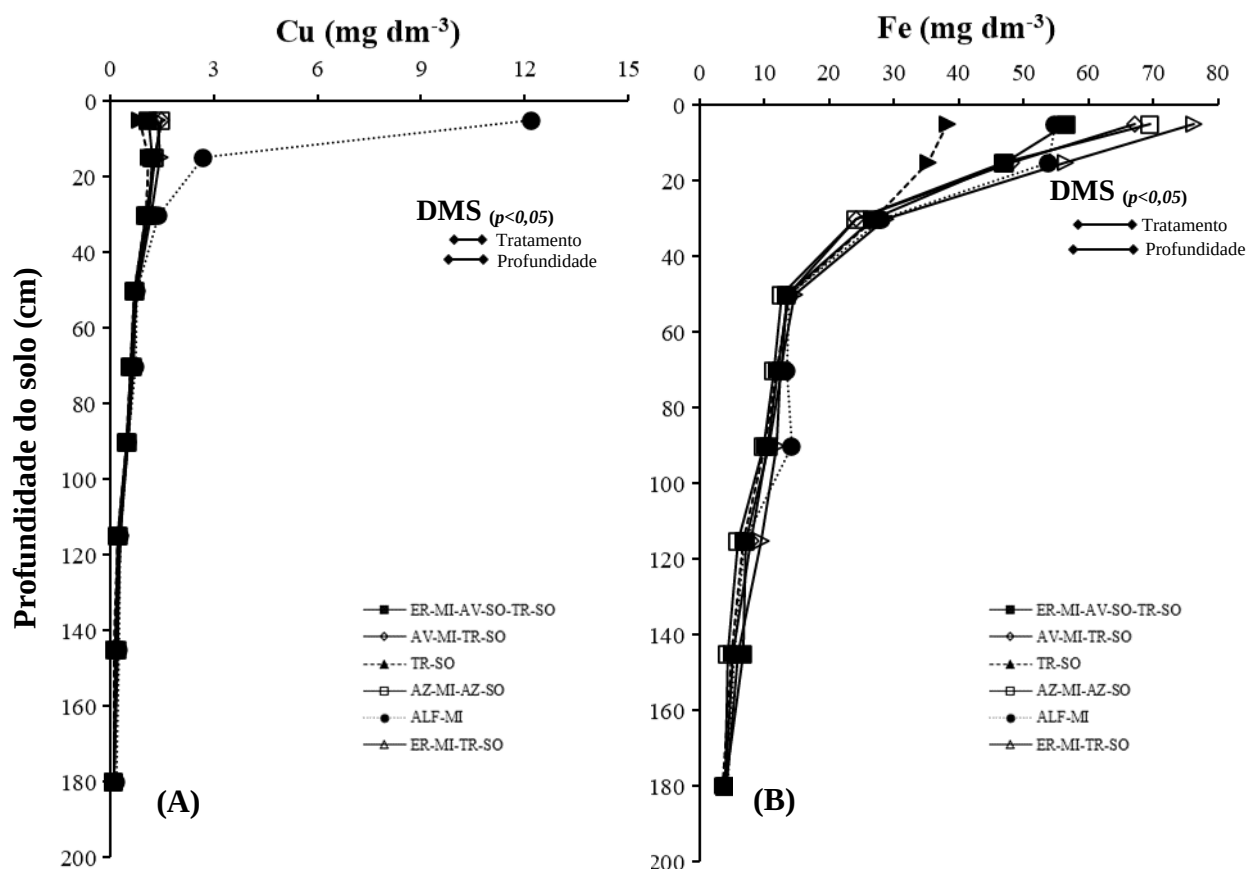


Os teores de Cu no solo foram influenciados significativamente pela interação dos sistemas de produção e profundidades de amostragem (Figura 8A). Nas camadas superficiais do solo, o sistema ALF-MI apresentou teores significativamente maiores de Cu em comparação aos demais sistemas ($12,2 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0–10 cm e $2,7 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 10–20 cm).

Os demais tratamentos não apresentaram diferença significativa para o teor de Cu nessas camadas. De 20–200 cm de profundidade, os tratamentos não diferiram significativamente entre si para o teor de Cu. Tiecher *et al.* (2013) relataram que em sistemas conservacionistas em que não há revolvimento do solo, há a tendência de acúmulo de nutrientes na superfície. Nascente *et al.* (2014) também observaram maiores teores de Cu em um solo cultivado sob rotação diversificada de culturas.

Houve diferença significativa entre os tratamentos em função das profundidades do solo para os teores de Fe no solo (Figura 8B). Na camada 0–10 cm, os sistemas ER-MI-TR-SO

Figura 8. Teores de Cu (A) e Fe (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



(76,2 mg dm⁻³) e AZ-MI-AZ-SO (69,5 mg dm⁻³) apresentaram teores de Fe significativamente semelhantes e maiores que os demais, mas os teores de Fe nos sistemas AZ-MI-AZ-SO e AV-MI-TR-SO (67,2 mg dm⁻³) também não diferiram estatisticamente entre si. Apresentando teores menores, os sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO (56,7 mg dm⁻³) e ALF-MI (55,0 mg dm⁻³) foram estatisticamente iguais.

O menor teor de Fe na camada superficial (0–10 cm) foi encontrado no sistema TR-SO (38,2 mg dm⁻³). Na camada de 10–20 cm, os sistemas ER-MI-TR-SO, ALF-MI e AV-MI-TR-SO apresentaram teores de Fe significativamente maiores que os demais, porém os teores de Fe nos sistemas ALF-MI e AV-MI-TR-SO foram estatisticamente iguais aos dos sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO e AZ-MI-TR-SO. O sistema que apresentou o menor teor de Fe na camada de 10–20 cm foi também TR-SO, com 32,2 mg dm⁻³.

Não houve diferença significativa no teor de Fe no solo entre os diferentes sistemas de produção nas camadas de 20–200 cm de profundidade devido à baixa mobilidade desse nutriente no solo. Geralmente, o teor de Fe no solo é pouco afetado pelo manejo e sistemas de produção, possivelmente porque os Latossolos são caracterizados por possuírem grande

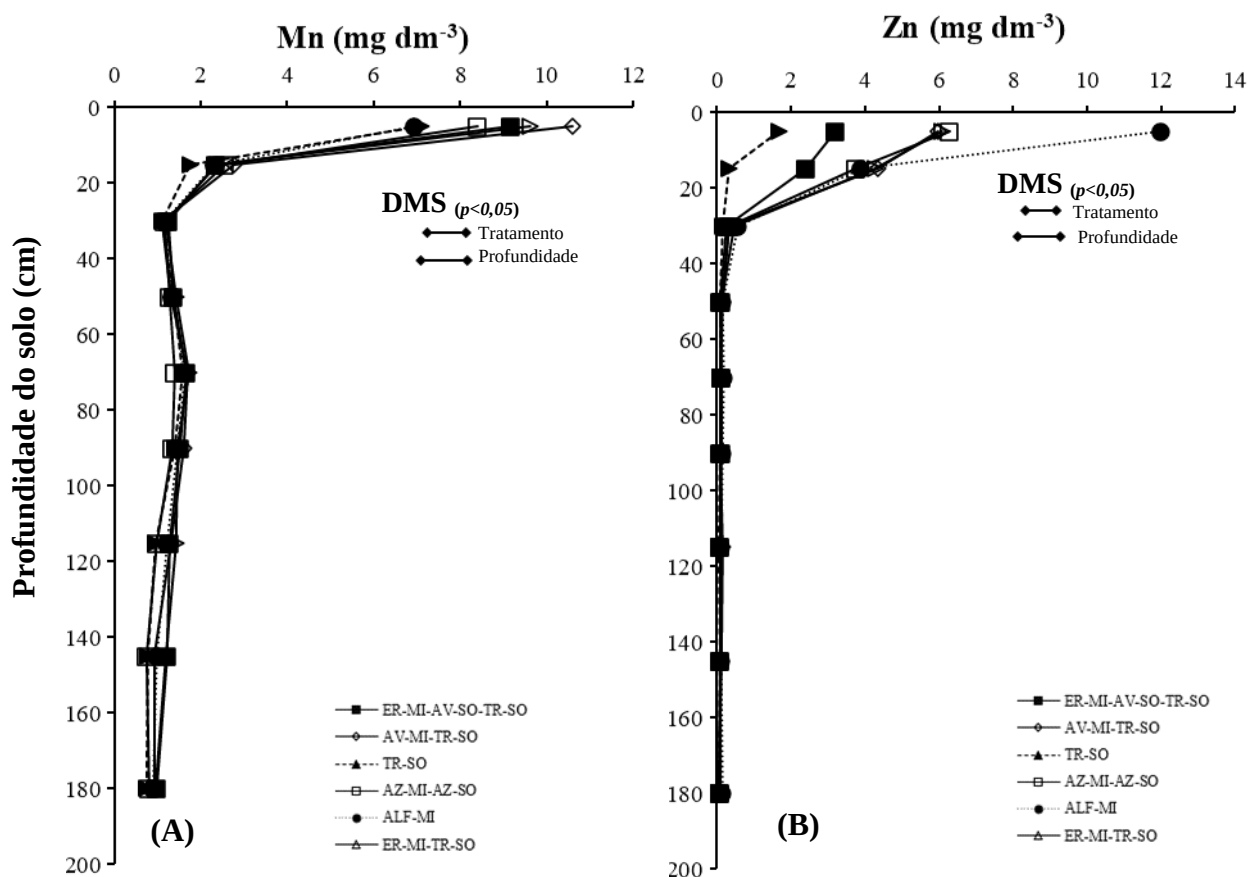
concentração desse nutriente, sendo raros os casos de manejo agrícola que altere o teor de Fe no solo (FAGERIA *et al.*, 2002).

Os teores de Mn no solo foram influenciados significativamente pelos sistemas de produção e profundidade de amostragem (Figura 9A). Porém, somente houve diferença significativa no teor de Mn entre os sistemas de produção na camada superficial de 0–10 cm. Nessa camada, os teores de Mn nos sistemas AV-MI-TR-SO (10,6 mg dm⁻³) e ER-MI-TR-SO (9,6 mg dm⁻³) foram estatisticamente maiores que nos demais tratamentos, e as menores médias significativas foram encontradas nos sistemas TR-SO (7,1 mg dm⁻³) e ALF-MI (7,0 mg dm⁻³). No sistema plantio direto, há tendência de ocorrer teores relativamente altos de Mn no solo, devido aos baixos valores de pH obtidos nesse sistema (FAGERIA *et al.*, 2002; VENDRAME *et al.*, 2007). Nascente *et al.* (2014) também observaram maiores teores de Mn em um solo cultivado sob rotação diversificada de culturas.

Houve diferença significativa nos teores de Zn em função dos diferentes sistemas de produção e profundidades de amostragem (Figura 9B). Na camada de 0–10 cm, o sistema ALF-MI proporcionou teor de Zn de 12,0 mg dm⁻³, significativamente maior que os demais tratamentos, enquanto o sistema TR-SO proporcionou teor de Zn de 1,7 mg dm⁻³, significativamente menor em relação aos demais tratamentos. Na camada de 10–20 cm, os maiores teores de Zn foram encontrados nos sistemas AV-MI-TR-SO (4,3 mg dm⁻³), ER-MI-TR-SO (4,3 mg dm⁻³), ALF-MI (3,9 mg dm⁻³) e AZ-MI-AZ-SO (3,7 mg dm⁻³), enquanto o menor teor de Zn foi observado no sistema TR-SO (0,3 mg dm⁻³).

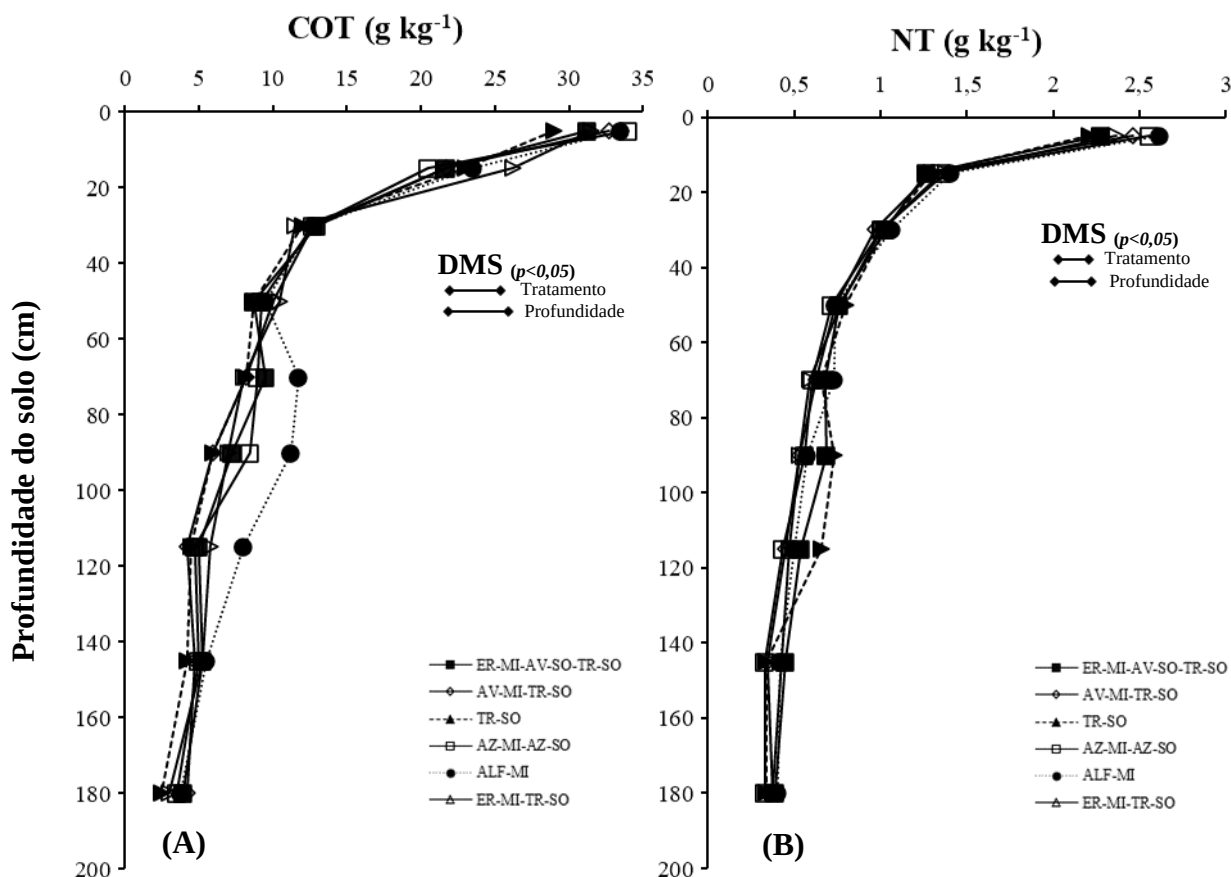
Nas demais camadas de solo avaliadas (20–200 cm), não houve diferença significativa nos teores de Zn entre os sistemas. De forma semelhante ao Mn, a disponibilidade do Zn também é afetada pelo pH, sendo que o aumento no pH proporciona redução no teor de Zn no solo (FAGERIA; STONE, 2004). Nascente *et al.* (2014) também observaram maiores valores de Zn em uma rotação diversificada de culturas sob sistema plantio direto.

Figura 9. Teores de Mn (A) e Zn (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



Houve diferença significativa entre os teores de C orgânico total (COT) nas diferentes camadas de solo de acordo com os sistemas de produção (Figura 10A). Os teores de COT foram maiores nas camadas mais superficiais do solo. Na camada de 0–10 cm, os sistemas AZ-MI-AZ-SO ($34,0 \text{ g kg}^{-1}$), ALF-MI ($33,5 \text{ g kg}^{-1}$), AV-MI-TR-SO ($32,7 \text{ g kg}^{-1}$), ER-MI-TR-SO ($31,5 \text{ g kg}^{-1}$) e ER-MI-AV-SO-TR-SO ($31,2 \text{ g kg}^{-1}$) apresentaram maiores teores de COT; porém, os teores dos dois últimos sistemas não diferiram daquele da sucessão TR-SO ($29,0 \text{ g kg}^{-1}$). Na camada de 10–20 cm, os maiores teores de COT ocorreram nos sistemas ER-MI-TR-SO ($26,3 \text{ g kg}^{-1}$), ALF-MI ($23,5 \text{ g kg}^{-1}$) e TR-SO ($23,0 \text{ g kg}^{-1}$), sendo que os teores dos dois últimos tratamentos não diferiram dos encontrados nos sistemas ER-MI-AV-SO-TR-SO ($21,7 \text{ g kg}^{-1}$), AV-MI-TR-SO ($21,7 \text{ g kg}^{-1}$) e AZ-MI-AZ-SO ($20,5 \text{ g kg}^{-1}$), os quais apresentaram os menores teores de COT. Na camada de 60–80 cm, os sistemas ALF-MI ($11,7 \text{ g kg}^{-1}$), ER-MI-AV-SO-TR-SO ($9,5 \text{ g kg}^{-1}$), AZ-MI-AZ-SO ($9,0 \text{ g kg}^{-1}$), AV-MI-TR-SO ($8,2 \text{ g kg}^{-1}$) e TR-SO ($8,2 \text{ g kg}^{-1}$) apresentaram os maiores teores de COT, sendo que os teores dos quatro últimos tratamentos foram semelhantes ao do sistema ER-MI-TR-SO ($8,0 \text{ g kg}^{-1}$).

Figura 10. Teores de C orgânico total (A) e N total (B) em diferentes profundidades do solo em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



Na profundidade de 80–100 cm, os teores de COT nos sistemas ALF-MI (11,2 g kg⁻¹) e AZ-MI-AZ-SO (8,5 g kg⁻¹) foram significativamente maiores que os dos demais tratamentos; porém, o teor deste último foi semelhante ao dos demais tratamentos que apresentaram menores de COT, com média de 6,6 g kg⁻¹. Na camada de 100–130 cm, os sistemas ALF-MI (8,0 g kg⁻¹), ER-MI-TR-SO (5,7 g kg⁻¹), ER-MI-AV-SO-TR-SO (5,0 g kg⁻¹), AZ-MI-AZ-SO (4,7 g kg⁻¹) e TR-SO (4,5 g kg⁻¹) apresentaram teor de COT significativamente maior que os demais tratamentos; porém os teores de COT nos quatro últimos sistemas não diferiram daquele do sistema AV-MI-TR-SO que apresentou o menor teor (4,2 g kg⁻¹). Nas camadas de 20–60 e de 130–200 cm de profundidade não houve diferença significativa dos teores de COT entre os tratamentos.

Em um estudo realizado anteriormente na mesma área experimental também foram relatados incrementos maiores de COT nas camadas mais superficiais do solo (0–20 cm) (SANTOS *et al.*, 2011) e até 100 cm de profundidade (ALBUQUERQUE *et al.* 2015) pelo azevém e pela alfafa, os quais são destinados para a produção de pré-secado e feno. Essas

espécies incrementam C no sistema principalmente pelo sistema radicular, o qual é estimulado pelos eventos de corte e rebrote.

O milho também contribui com o incremento de COT no sistema por possuir alta relação C:N e sistema radicular profundo, acarretando decomposição mais lenta e favorecendo o aporte de matéria orgânica em superfície (BEZERRA *et al.*, 2013) e subsuperfície. Hartman (2016) já havia observado maiores teores de COT até 100 cm de profundidade em sistemas adubados com superfosfato triplo, como é o caso do sistema ALF-MI.

Gazolla *et al.* (2015) também relataram incremento de C orgânico via sistema radicular em sistema de integração lavoura-pecuária, mais especificamente o consórcio de milho com braquiária que, além de propiciar a deposição de resíduos culturais de degradação mais lenta, favorece o aporte de matéria orgânica pelo sistema radicular das gramíneas. Albuquerque *et al.* (2015) sugeriram que os sistemas que visam a produção de feno acumulam mais C abaixo de 20 cm de profundidade; já, os sistemas que visam a produção de grãos, acumulam mais C nos primeiros 20 cm.

Kluthcouski *et al.* (2003) relataram que sistemas de rotação de culturas do tipo grão/grão, sem a introdução de espécies capazes de produzir grande quantidade de matéria seca (superior a 10 Mg ha⁻¹), não proporcionam incrementos significativos nos teores de matéria orgânica do solo ao longo dos anos. Soussana e Lemaire (2014) observaram que o COT abaixo de 30 cm no perfil do solo pode ser responsável por mais de 50% do COT armazenado no solo.

Diekow *et al.* (2005) já tinham demonstrado a importância da cobertura com leguminosas para melhorar os estoques de matéria orgânica e, portanto, a qualidade do solo e também ambiental em regiões subtropicais úmidas. Os mesmos autores também destacaram que o subsolo pode ser muito importante no sequestro de C, sendo que nesse estudo cerca de 42% do estoque de C do solo esteve entre as camadas de 20 e 100 cm de profundidade.

O pequeno incremento no teor de COT para a sucessão TR-SO deve ter sido consequência da menor adição de biomassa, tanto via parte aérea quanto pelo sistema radicular. Apesar de a soja ser uma leguminosa com alta eficiência na fixação simbiótica de N₂, grande parte do N fixado é exportado pelos grãos (ALVES *et al.*, 2002).

O teor de nitrogênio total (NT) foi influenciado significativamente pelos tratamentos somente na camada superficial do solo (0–10 cm) (Figura 10B). Nessa camada da superfície, o tratamento ALF-MI se destacou com o maior teor de NT (2,61 g kg⁻¹), mas não houve diferença significativa entre esse teor e o encontrado nos tratamentos AZ-MI-AZ-SO e AV-MI-TR-SO.

Já, o tratamento TR-SO apresentou o menor teor de NT ($2,2 \text{ g kg}^{-1}$), embora esse teor tenha sido estatisticamente semelhante ao dos tratamentos ER-MI-TR-SO e ER-MI-AV-SO-TR-SO. Os resultados obtidos corroboram com estudos feitos por Siqueira Neto *et al.* (2010) em um Latossolo sob plantio direto, em que os teores de NT na camada superficial foram maiores ao longo dos anos de adoção do sistema, fato possivelmente ocorrido devido à deposição de resíduos culturais, à rotação de culturas e ao não revolvimento do solo. O não revolvimento do solo favorece o acúmulo de NT pela redução das taxas de mineralização (AMADO *et al.*, 2006; BREVILIERI *et al.*, 2016).

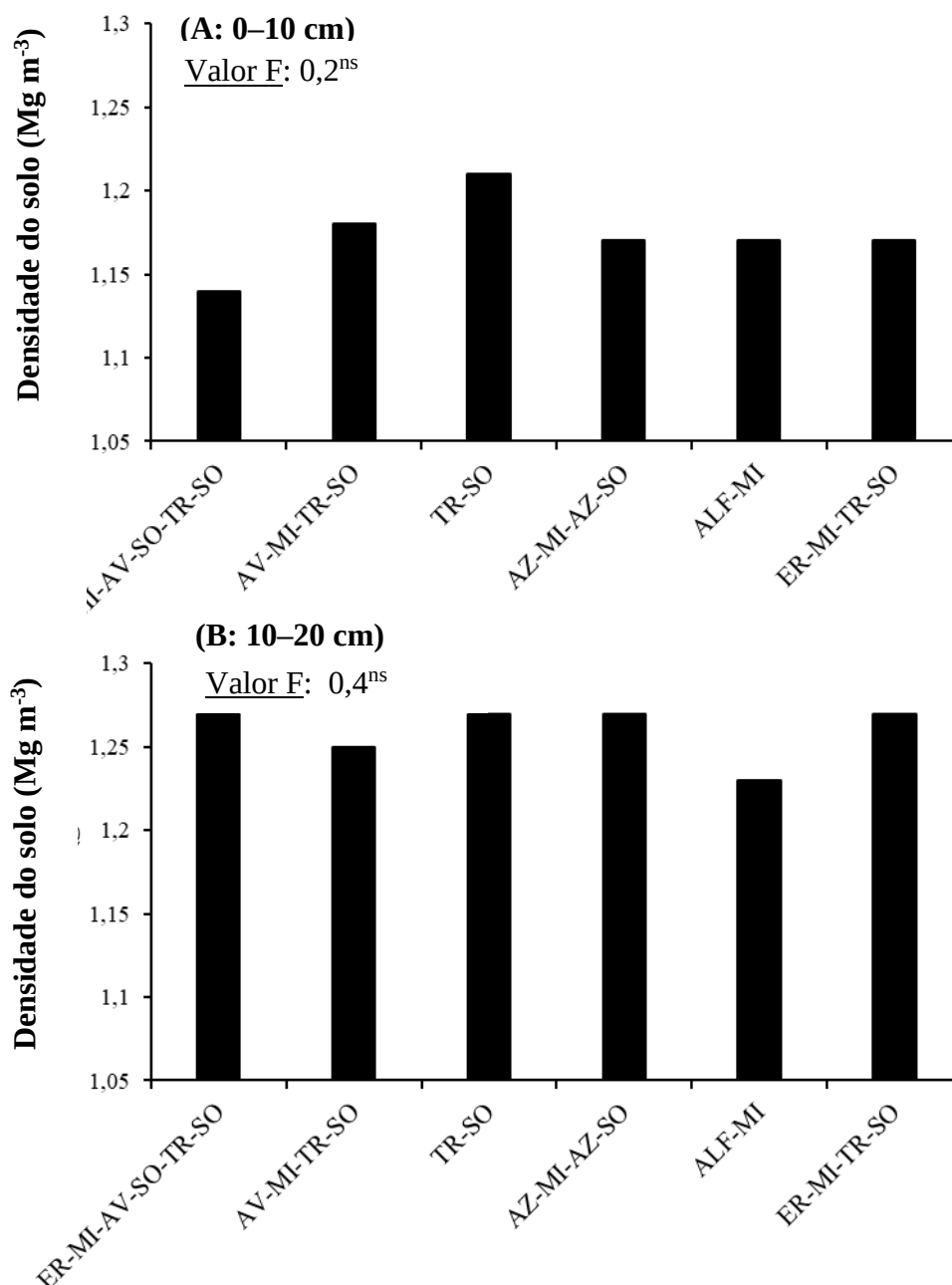
O aumento no teor de NT somente até 10 cm, diferente do incremento de COT que ocorreu também em camadas mais profundas do solo, pode estar relacionado à menor relação C:N dos resíduos de raízes localizadas na camada superficial do solo e sugere que o N está sendo aportado preferencialmente nas camadas superiores do solo. No sistema plantio direto, o uso de leguminosas pode aumentar o teor de NT no solo pelo aporte de N via fixação biológica (SISTI *et al.*, 2004). A soja certamente contribuiu para esse aporte, entretanto, a presença apenas da leguminosa pode não promover acúmulo de NT no sistema, devido à elevada taxa de exportação de N pelos grãos (ALVES *et al.*, 2002).

A alfafa é uma leguminosa semiperene fixadora de N_2 atmosférico que, além de proporcionar alta adição de C via sistema radicular, ocasiona incremento de N no sistema (SANTOS *et al.*, 2011). Diekow *et al.* (2005) observaram aumento nos estoques de C e N em sistemas de cultivo de longa duração (17 anos) à base de leguminosas na região Sul do Brasil. Esses resultados mostram o potencial de espécies de leguminosas tropicais em aumentar o sequestro de C, o conteúdo de matéria orgânica, a qualidade do solo e a sustentabilidade do agroecossistema.

6.2 DENSIDADE DO SOLO

A densidade do solo nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm não foi influenciada significativamente pelos tratamentos (Figura 11). Os valores médios de densidade do solo variaram de $1,14$ a $1,21 \text{ Mg m}^{-3}$ na profundidade de 0–10 cm e de $1,23$ a $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ na profundidade de 10–20 cm.

Figura 11. Densidade do solo nas profundidades de 0–10 cm (A) e 10–20 cm (B) em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



Devido à ausência de revolvimento do solo, o sistema plantio direto possui tendência de aumentar o adensamento da camada superficial. Entretanto, a densidade pode diminuir com o tempo de adoção do sistema, pois o mesmo tem demonstrado melhoria física do solo em razão do aumento no teor de matéria orgânica, melhorando a estrutura do solo (MENDONÇA *et al.*, 2013) e a eficiência dos sistemas produtivos (COSTA *et al.*, 2015). Em um estudo realizado na mesma área experimental, Silva *et al.* (2012) observaram menores valores de densidade do solo na camada de 5–20 cm no sistema semiperene ALF-MI. Tal efeito foi atribuído ao sistema

radicular com ação mecânica de crescimento tanto radial como longitudinal favorecer a formação de poros e canais no solo.

6.3 ESTOQUES DE COT, NT, CAQ E COXP

Os estoques de COT e NT na camada de 0–20 cm não foram influenciados significativamente pelos sistemas de produção (Figura 12). Os estoques de COT variaram entre os tratamentos de 63,1 a 70,3 Mg ha⁻¹. Já, os estoques de NT variaram de 4,2 a 4,8 Mg ha⁻¹. A ausência de diferença significativa entre os sistemas de produção para os estoques de COT e NT pode ser explicada pela tendência de o sistema plantio direto em estabilizar os atributos do solo pela adição continuada de resíduos em que a matéria orgânica exerce grande influência no processo de formação e estabilização de agregados sem perturbação do solo (VEZZANI e MIELNICZUK, 2011) e pela ação dos microrganismos do solo que se encontram de forma mais ativa nas camadas superficiais do solo (CARDOSO *et al.*, 2020). Sisti *et al.* (2004) observaram que os maiores estoques de COT e NT ocorreram em camadas mais profundas do solo.

Os estoques de COXP e de CAQ no solo na camada de 0–20 cm não foram influenciados significativamente pelos sistemas de produção (Figura 13). Os estoques de COXP variaram entre os tratamentos de 9,3 a 9,9 Mg ha⁻¹. Já, os estoques de CAQ variaram de 1,2 a 1,9 Mg ha⁻¹.

O estoque de COXP representou cerca de 7,2% e o de CAQ cerca de 1,2% em relação ao estoque de COT. Haynes e Francys (1993) enfatizaram que o CAQ está ligado à biomassa microbiana, enquanto o COXP está relacionado às frações menores do solo, sendo uma fração mais lábil (CULMAN *et al.*, 2012). A estabilidade do solo também está relacionada aos fungos e bactérias em sistema plantio direto (LIENHARD *et al.*, 2013) e com as frações mais lábeis do C. Assim, essas frações de CAQ e COXP podem influenciar positivamente a formação de agregados na proteção do COT (TIVET *et al.*, 2013). Por possuírem alta correlação com a atividade microbiológica do solo e serem altamente sensíveis a mudanças causadas pelo manejo do solo, essas formas são importantes indicadores de qualidade do solo (CULMAN *et al.*, 2012). O aumento do estoque de CAQ é indicativo de condições favoráveis ao aumento da atividade microbiológica do solo (TIVET *et al.*, 2013), mas isso não ocorreu no presente estudo. O COXP faz parte da fração com alta instabilidade e é influenciado pelos sistemas de manejo que fornecem material orgânico ao solo (BAYER *et al.*, 2002), como evidenciado neste estudo.

Santos *et al.* (2011) já haviam observado estoques menores de C em sistemas com mais cultivos de leguminosas, pois a biomassa dessa família possui menor relação C:N e, conseqüentemente, decomposição mais rápida. Este é o caso do sistema ER-MI-TR-SO, o qual apresentou estoque de COXP menor em relação AV-MI-TR-SO que é mais cultivado com gramíneas. Outra justificativa seria a maior dose de N empregada no sistema AV-MI-TR-SO

(Tabela 3), a qual pode ter estimulado a produção de biomassa vegetal e aumentado o estoque de COXP (LOVATO *et al.*, 2004).

Figura 12. Estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) na camada de 0–20 cm em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.

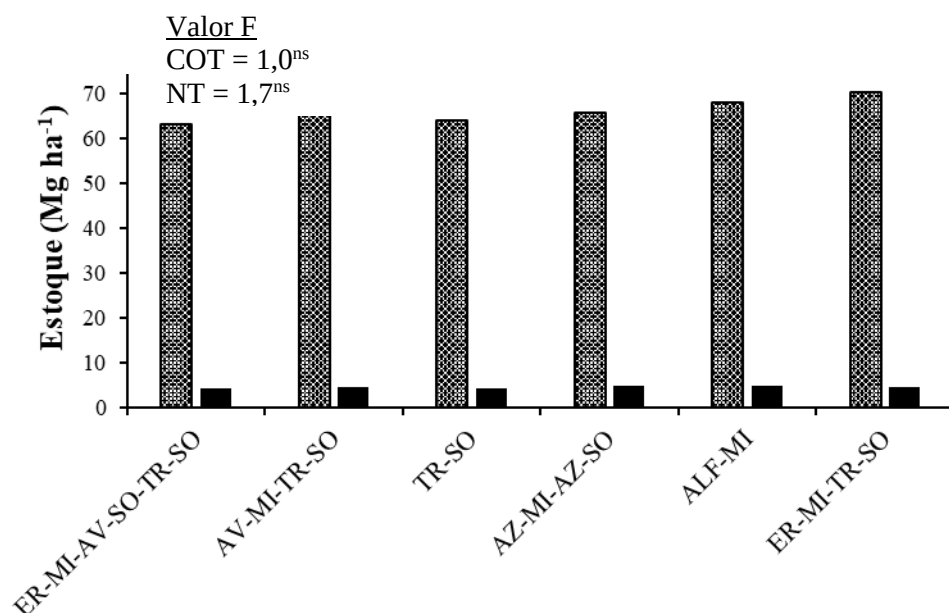
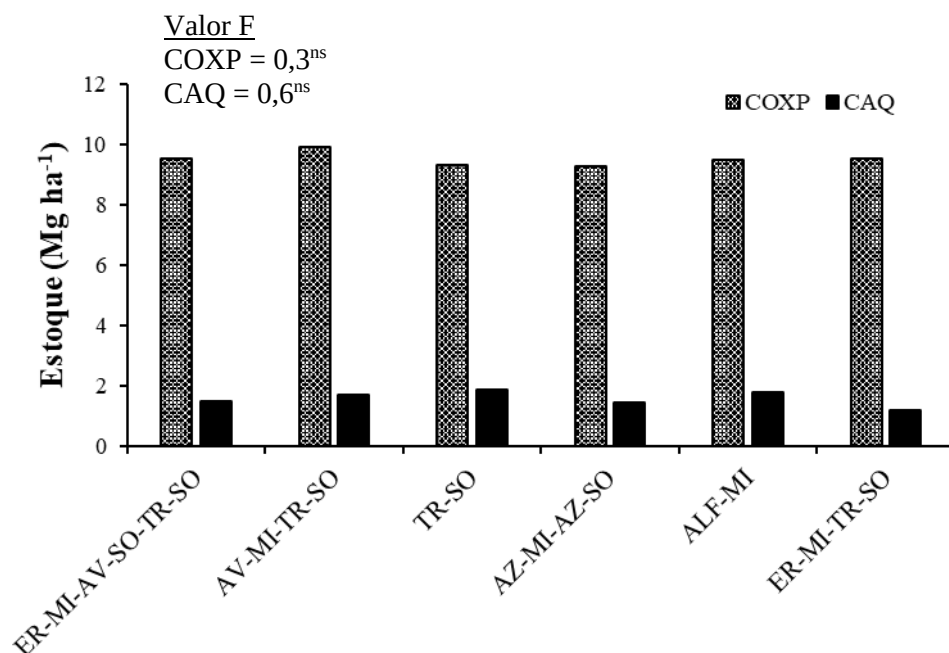


Figura 13. Estoques de carbono oxidável em permanganato de potássio (COXP) e carbono em água quente (CAQ) na camada de 0–20 cm em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto (* $p < 0,05$).



6.4 APORTE DE C PELA BIOMASSA DAS CULTURAS E RENDIMENTO DE GRÃOS

O sistema que mais acumulou C através da biomassa dos resíduos foi a rotação bianual AV-MI-TR-SO e o que menos acumulou C da biomassa foi a sucessão TR-SO ao longo dos 31 anos de avaliação (Tabela 4). O sistema AV-MI-TR-SO acumulou cerca de 7 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ e a sucessão TR-SO acumulou cerca de 3 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, ou seja, este último apresentou menos da metade de acúmulo de C da biomassa em relação à rotação bianual.

O maior acúmulo de C pela biomassa no sistema bianual pode ser atribuído aos cultivos frequentes de culturas com alta relação C:N, como a aveia, milho e trigo. Grandes incrementos de C são esperados em sistemas que incluem a cultura do milho, visto a sua grande capacidade de produção de biomassa com alta relação C:N e, conseqüentemente, com decomposição mais lenta (CARVALHO *et al.*, 2022).

Via sistema radicular, o sistema semiperene ALF-MI apresentou acúmulo de C significativamente maior em relação aos demais sistemas (Tabela 4). No geral, o sistema radicular contribuiu com 20% e a parte aérea com 80% do acúmulo de C em relação ao total. Em estudos realizados no mesmo experimento, a alfafa e o azevém (AZ-MI-AZ-SO) também incorporaram C ao sistema, principalmente, pelo sistema radicular, o qual foi estimulado pelos eventos de corte e rebrote no processo de fenação (SANTOS *et al.*, 2011; ALBUQUERQUE *et al.*, 2015). Santos *et al.* (2011) já tinham observado menor adição de resíduos pelas raízes do sistema ER-MI-TR-SO, o que pode ter contribuído para o menor acúmulo de C nesse sistema.

Tabela 4. Acúmulo de C da biomassa de resíduos no período de 1989 a 2021 em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.

Sistema	Biomassa de C dos resíduos (31 anos)		
	Parte aérea	Sistema radicular	Total
	----- Mg ha ⁻¹ -----		
ER-MI-AV-SO-TR-SO	162,4 c	33,7 e	196,1 c
AV-MI-TR-SO	199,7 a	43,2 c	242,8 a
TR-SO	101,1 e	19,7 f	120,8 f
AZ-MI-AZ-SO	133,6 d	47,7 b	181,2 d
ALF-MI	85,0 f	48,9 a	133,9 e
ER-MI-TR-SO	188,8 b	38,7 d	227,5 b
Valor F	2689,6**	2616,7**	2004,7**
CV (%)	1,2	1,1	1,2

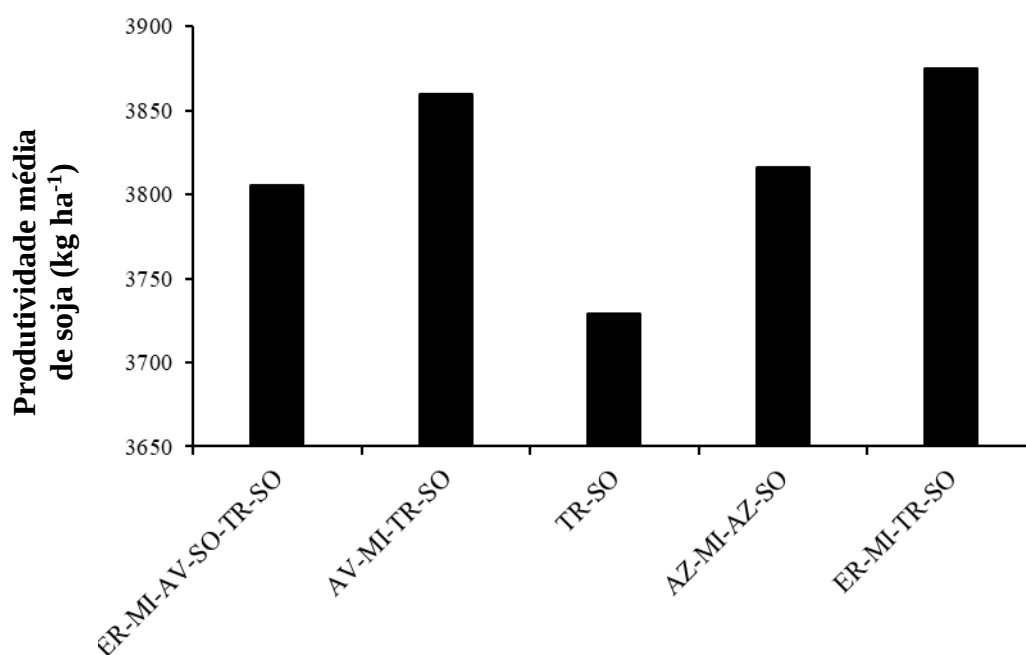
***p*<0,01.

O sistema TR-SO foi o que menos acumulou C ao longo dos 31 anos de condução do experimento visto que sistemas menos diversificados conduzidos por longos períodos podem causar redução na produtividade, principalmente por mudanças em atributos do solo e aumentos na incidência de pragas e doenças (GHORBANI *et al.*, 2009).

No período de 1989 a 2021, os sistemas ER-MI-TR-SO (3875 kg ha⁻¹), AV-MI-TR-SO (3859 kg ha⁻¹), AZ-MI-AZ-SO (3816 kg ha⁻¹) e ER-MI-AV-SO-TR-SO (3805 kg ha⁻¹) apresentaram as maiores produtividades médias de grãos de soja, mas os três últimos não diferiram estatisticamente da sucessão TR-SO (3729 kg ha⁻¹), cujo sistema apresentou a menor produtividade média de grãos de soja (Figura 14).

A maior produtividade de soja em sistemas diversificados já havia sido observada em outros estudos. Santos *et al.* (2014) observaram um ganho na produtividade acumulada de soja de 17% em sistemas de rotação de culturas com milho em relação a sistemas com trigo. Canalli *et al.* (2020) mostraram que a produtividade da soja em sistema de rotação foi 25% maior do que a média obtida no Estado do Paraná. Garbelini *et al.* (2022) também observaram aumento de 6% na produtividade de soja em sistemas diversificados de rotação de culturas após 31 anos de condução do estudo.

Figura 14. Produtividade média de grãos de soja no período de 1989 a 2021 em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.

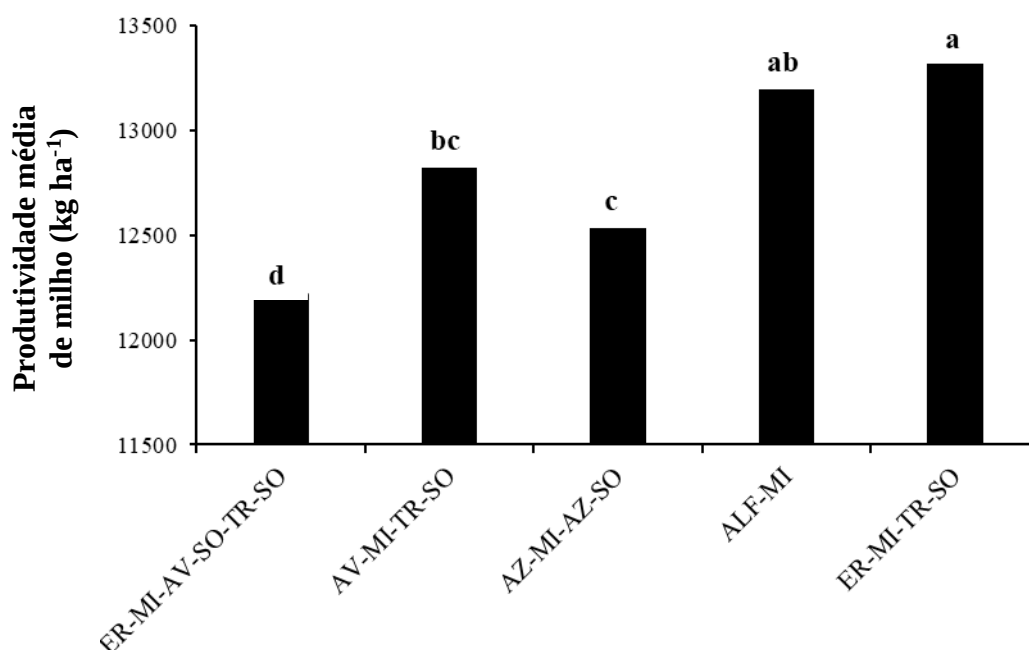


O rendimento médio de grãos de milho também foi significativamente influenciado pelos sistemas de produção (Figura 15). Os sistemas ER-MI-TR-SO (13365 kg ha⁻¹) e ALF-MI (13253 kg ha⁻¹) apresentaram as maiores produtividades médias de grãos em 31 anos em relação aos demais sistemas, mas este último também foi estatisticamente igual à rotação bianual AV-MI-TR-SO (12874 kg ha⁻¹). O sistema trianual ER-MI-AV-SO-TR-SO apresentou a menor produtividade média de grãos neste período (12220 kg ha⁻¹).

A maior produtividade de grãos de milho apresentada pela rotação ER-MI-TR-SO pode ser explicada pelo cultivo de uma leguminosa antecedendo o milho. As leguminosas, por apresentarem baixa relação C:N, acabam potencializando a mineralização de N (UZOH *et al.*, 2019) e, assim, fornecendo a disponibilidade de N no solo para o crescimento do milho (COSTA *et al.*, 2017).

Canalli *et al.* (2020) observaram aumento de 36% na produtividade de milho cultivado após leguminosa em relação ao rendimento médio do Estado do Paraná. Resultados semelhantes no incremento da produtividade de grãos de milho também foram apresentados por Garbelini *et al.* (2022). Bossolani *et al.* (2023) observaram aumento no rendimento de grãos de milho consorciado com *Brachiaria* em um sistema conservacionista conduzido há 18 anos com aplicação de doses de calcário.

Figura 15. Produtividade média de grãos de milho no período de 1989 a 2021 em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.



6.5 ATIVIDADE DAS ENZIMAS ARILSULFATASE E β -GLICOSIDASE NO SOLO

Os sistemas de produção influenciaram as atividades das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase no solo, na camada de 0–10 cm (Tabela 5). Os sistemas AV-MI-TR-SO, ER-MI-AV-SO-TR-SO e ER-MI-TR-SO apresentaram as maiores atividades da enzima ligada ao ciclo do S (MENDES *et al.*, 2020), sendo que as atividades dos dois últimos sistemas também foram semelhantes à do sistema AZ-MI-AZ-SO.

Os sistemas TR-SO e ALF-MI foram os que apresentaram as menores atividades da enzima arilsulfatase, sendo semelhantes somente à do sistema AZ-MI-AZ-SO. A falta de relação entre o S no solo (Figura 6B) com a atividade da enzima ligada ao ciclo do S pode ser devida a alta mobilidade desse nutriente no solo (DECHEN; NACHTIGALL, 2007), não tendo sido observada diferença estatística entre os sistemas de produção para o teor de S na camada superficial do solo.

A atividade da enzima arilsulfatase teve um comportamento parecido com o COXP (Figura 13). Inagaki *et al.* (2017) relataram que as atividades da arilsulfatase e da β -glicosidase se mostraram eficientes para reportar alterações, principalmente nas frações lábeis do COT em um Latossolo altamente intemperizado. Essa tendência de a atividade da arilsulfatase e do COXP se comportarem de forma parecida também já foi observada por Sá *et al.* (2018) em um estudo que avaliou o impacto do manejo do solo e das sucessões ecológicas.

Sobre a atividade da enzima β -glicosidase, enzima associada ao ciclo do C (MENDES *et al.*, 2020), o sistema ALF-MI apresentou atividade enzimática estatisticamente maior em relação aos demais sistemas (Tabela 5). Tal resultado parece ter sido influenciado pelo COT (Figura 10A) e pelo acúmulo de C da biomassa (Tabela 4), considerando que o sistema semiperene também apresentou valores estatisticamente superiores em relação aos demais sistemas de produção para estas variáveis. Portanto, o sistema ALF-MI pode ser considerado o que mais contribuiu para a qualidade do solo, pois entende-se que a atividade crescente da atividade da enzima β -glicosidase pode refletir na capacidade do solo de decompor os resíduos vegetais e melhorar a disponibilidade de nutrientes para as culturas (STOTT *et al.*, 2010), causando efeito positivo na saúde do solo.

Tabela 5. Atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase em amostras secas de solo na camada de 0–10 cm em função de sistemas de produção de longa duração sob plantio direto.

Sistema	Arilsulfatase	β -glicosidase
	----- $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol g de solo}^{-1} \text{ h}^{-1}$ -----	
ER-MI-AV-SO-TR-SO	342,5 ab	190,9 b
AV-MI-TR-SO	366,1 a	189,8 b
TR-SO	263,8 c	165,9 b
AZ-MI-AZ-SO	271,8 bc	192,8 b
ALF-MI	239,9 c	267,6 a
ER-MI-TR-SO	314,1 abc	185,2 b
Valor F	9,0*	10,6*
CV (%)	10,9	10,8

* $p < 0,05$.

7 CONCLUSÕES

O sistema de produção semiperene ALF-MI proporcionou maiores teores de P, Ca, Cu, Fe, Zn, Mn e NT nas camadas mais superficiais do solo e ainda ocasionou incrementos de COT, K, S e B em profundidade.

O acúmulo de C da biomassa dos resíduos foi maior no sistema AV-MI-TR-SO e menor no sistema TR-SO.

O sistema ER-MI-TR-SO apresentou a maior produtividade média de grãos de soja e milho ao longo dos 31 anos do estudo, destacando a importância da rotação diversificada de culturas e do cultivo de leguminosa antecedendo o milho para a melhoria na disponibilidade de N no solo.

A atividade da enzima β -glicosidase foi maior no sistema ALF-MI, o qual acumulou mais COT.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. A.; DIECKOW, J.; SORDI, A.; PIVA, J. T.; BAYER, C.; MOLIN, R.; PERGHER, M.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. **Soil Use and Management**, v.31, p.1–9, 2015.
- ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Soybean benefit to a subsequent wheat cropping system under zero tillage. In: Nuclear techniques in integrated plant nutrient, water and soil management. **Vienna, IAEA**, p.87-93, 2002.
- AMADO, T. J. C.; MIELNICZK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.241-248, 2002.
- 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, p.1599–1607, 2006.
- ANGHINONI, I.; Fertilidade do solo e seu Manejo em Sistema Plantio Direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L.; (1ª Ed). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Cap XV, p.874-990, 2007.
- ARF, O; MEIRELLES, F. C.; PORTUGAL, J. R.; BUZZETI, S.; SÁ, M. E.; RODRIGUES, R. A. F. Benefícios do milho consorciado com gramínea e leguminosas e seus efeitos na produtividade em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.17, p. 431-444, 2018.
- BALIGAR, V.C., WRIGHT, R.J., SMEDLEY, M.D. Enzyme activities in hill land soils of the Appalachian region. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. 19:367- 384, 1988.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; ERNANI, P. R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on subtropical soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.238, p.133-140, 2002.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de Carbono em frações lábeis na matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 39, p.677-683, 2004.
- BEZERRA, R. P. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Formas de carbono em Latossolo sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no cerrado. **Seminário de Ciências Agrárias**, 2013.
- BLAKE, G. R.; HARTAGE, K. H. Bulk density. In: Klute, a. (Ed), *Methods of Soil Analysis*. Parte 1,2. Ed., Agron. 9, p.364-367, 1986.
- BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C., COSTA C. Desenvolvimento da cultura do milho em consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. **Energia na Agricultura**, v.21, p.19-33, 2006.

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARIANO, E.; MORETTI, L. G.; PORTUGAL, J. R.; FONSECA, M.; MOMESSO, L.; DALLA CORT, A. S.; COSTA, V. E.; CANTARELLA, H. Higher lime rates for greater nitrogen recovery: A long-term no-till experiment labeled with ¹⁵N. **Field Crops Research**, v.299, 2023.

BRADY, N. C.; WEIL, R. Elementos da natureza e propriedades do solo. In: **Elementos da natureza e propriedades do solo**. Porto Alegre, 2013.

BREVILIERI, R. C. Carbono, Nitrogênio e Fluxos de óxido nitroso e metano em latossolo subtropical sob sistemas de preparo e níveis de adubação. **Universidade Federal do Paraná**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), 2016.

BRUN, E. J. Matéria orgânica do solo em plantios de *Pinus taeda* e *Pinus elliotti* em duas regiões do Rio Grande do Sul. **Universidade Federal de Santa Maria**, Santa Maria- RS. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), 2008.

BORTOLUZZI, E. C.; ELTZ, F. L. F. Efeito do manejo mecânico da palhada de aveia preta sobre a cobertura, temperatura, teor de água no solo e emergência da soja em Sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p. 449-457, 2000.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2008.

CANALLI, L.B.S.; COSTA, G.V.; VOLSI, B.; LEOCADIO, A.L.M.; NEVES, C.S.V.J.; TELLES, T.S. Production and profitability of crop rotation systems in southern Brazil. **Seminário de Ciências Agrárias**, v.41, p. 2541–2554, 2020.

CANTARELLA, H; Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L.; (1ª Ed). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap XV, p.874- 990.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas Práticas para uso Eficiente de Fertilizantes**. Piracicaba, v. 2, International Plant Nutrition Institute, 2010. p.5-46.

CARDOSO, R. A.; BENTO, A. S.; MORESKI, H. M.; GASPAROTTO, F. Influência da adubação verde nas propriedades físicas e biológicas do solo e na produtividade da cultura de soja. **Seminário: Ciências Biológicas e da Saúde**, v.35, p.51-60, 2014.

CARDOSO, G. R. G. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em função de diferentes rotações de culturas. **Universidade Federal da Grande Dourados**. Tese (Doutorado em agronomia), 2020.

CARNEIRO, M. A. C.; CORDEIRO, M. A. S.; ASSIS, P. C. R.; MORAES, E. S.; PEREIRA, H.S.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, v.67, p.455-462, 2008.

CARPIM, L. K.; ASSIS, R. L.; BRAZ, A. J. B. P.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R.; PEREIRA, V. C.; GOMES, G. V.; SILVA, A. G. Liberação de nutrientes pela palhada de milho em diferentes estádios fenológicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2813-2819, 2008.

CARVALHO, M. A. C. de et al. Plantas de cobertura, sucessão de culturas e manejo do solo em feijoeiro. **Bragantia**, v.66, p.659-668, 2007.

CARVALHO, A. Plantas de cobertura em SPD no Cerrado. **Embrapa Cerrado**, 2020.

CARVALHO, M. L.; VANOLLI, B. S.; SCHIEBELBEIN, B. E.; BORBA, D. A.; LUZ, F. B.; CARDOSO, G. M.; BORTOLO, L. S.; MAROSTICA, M. E. M.; SOUZA, V. S. Guia prático de plantas de cobertura: aspectos fitotécnicos e impactos sobre a saúde do solo. - Piracicaba: **ESALQ-USP**, p.126, 2022.

CASSOL, E. A.; DENARDI, J. E.; KOCHLANN, R. A. Sistema plantio direto: Evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M., editors. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5. p. 333-70, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4971-producao-de-graos-esta-estimada-em-312-5-milhoes-de-toneladas-na-safra-2022-23>>. Acesso em 16 mai. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2021. **Análise mensal- Janeiro 2023, trigo**. Acesso em 7 jun. 2023.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelo sistema plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p.527-535, 2003.

COSTA, S. E. V. G. A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F., MARTINS, A. P.; KUNRATH, T. R.; CECAGNO, D.; BALERINI, F. Impact of an integrated no-till crop-livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 2013.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura- pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 39, n. 3, p.852-863, 2015.

COSTA, P. F.; OLIVEIRA, P. S. R.; PIANO, T. J.; TAFFAREL, L. E.; ARRÚA, M. A. M.; SARTO, M. V. M.; FROES, C. K.; FERNANDES, S. S. L. Dry matter production, chemical composition and nutrient accumulation in winter crops. **African Journal of Agricultural Research**, v.12, p.2421-2426, 2017.

COUTINHO, F. S. et al. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. **Comunicata Scientia**, v. 1, n. 2, p.100- 105, 2010.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Benefits of integrating crops and tropical pastures as systems of production. **Better Crops**, Atlanta, v. 94, n. 2, p. 14-16, 2010.

CULMAN, S. W.; SNAPP, S. S.; FREEMAN, M. A.; SCHIPANSKI, M. E.; BENISTON, J.; LAL, R.; WANDER, M. M. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. **Soil Science Society of America Journal**, v.76, p.494-504, 2012.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL.; Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L.; (1ª Ed). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap III, p.92-129.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KOGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, v.81, p.87-95, 2005.

DUDA, G. P.; GUERRA, J. G. M.; MONTEIRO, M. T.; DE-POLLI, H.; TEIXEIRA, M. G. Perennial herbaceous legumes as live soil mulches and their effects on C, N and P of the microbial biomass. **Scientia Agrícola**, v.60, p.139-147, 2003.

DUXBURY, J. M.; SMITH, M. S.; DORAN, J. M. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: **Dynamics os soil organic matter in tropical ecisystems**. Honolulu: University of Hawai, Cap. 2, p.33-67, 1989.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.20, p.601–606, 1988.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**. 75, 529538. 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA, 2012. **A aveia no Brasil**. Documentos online. Disponível em <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/969145>>. Acesso em 27 nov.2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileira de Classificação de Solos**. 3ª ed. Brasília - DF, 353p., 2013.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M.F.S.; BAYER, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications In Soil Science and Plant**, v. 35, p. 889–901, 2004.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in crop production. **Advances in Agronomy**, New York, v. 77, p. 185-268, 2002.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 73-78, 2004.

FAGERIA, N. K. The use of nutrients in crops plants. **CRC Press**, Boca Raton, 430 p. 2009.

FERNANDES, C. H. S.; TEJO, D. P.; ARRUDA, K. M. A. Desenvolvimento do Sistema de Plantio Direto no Brasil: Histórico, Implantação e Culturas Utilizadas. **Uniciências**, v.23, n.2, p.83-88, 2019.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO E IRRIGAÇÃO FEBRAPDP. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em 05 mai.2023.

FIALHO, A. R. Sistemas de produção de soja em sucessão a culturas anuais de cobertura. **Instituto Federal Goiano**, Campos Rio Verde. Dissertação (Mestrado em Agronomia) 2020.

FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1549-1561, 2008.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região centro-sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Principles of no-till**. Disponível em <<http://www.fao.org/ag/Ca/6c.html>> Acesso: 15 mai. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT: Food and agriculture data**. Disponível em < <http://www.fao.org/faostat/>> Acesso: 17 mai. 2023.

FRANCHINI, J. C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.533-542, 1999.

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**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 459–467, 2000.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; JUNIOR, A. A. B.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; DE OLIVEIRA, M. C. N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, v.137, p.178-185, 2012.

FROIO, L. L. Alteração de qualidade de um solo arenoso e produtividade de soja em sistemas de produção agropecuários de longa duração. **Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), 2022.

GARBELINI, L.G.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; BETIOLI JUNIOR, E.; TELLES, T.S. Profitability of soybean production models with diversified crops in the autumn-winter. **Agronomy Journal**, v.112, p.4092–4103, 2020.

GARBELINI, L. G.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; COELHO, A. E.; TELLES, T. S. Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production systems. **European Journal of Agronomy**, v.137, 2022.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Seminário de Ciências Agrárias**, Londrina, v.36, p.693-704, 2015.

GEBREMEDHIN, B.; SCHWAB, G. The economic importance of crop rotation systems: evidence from the literature. **Staff Papper**. Department of agricultural economics Michigan State University, n.98-13, p.1-26, 1998.

GHANI, W. J.; DEXTER, M.; PERROT, K. W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. **Soil Biology and Biochemistry**. 35:1231-1243, 2003.

GHORBANI, R.; WILCOCKSON, S.; KOOCHKEI, A.; LEIFERT, C. Soil management for sustainable crop disease control: A review. In: E. Lichtfouse (ed.). **Organic farming, pest control and remediation of soil pollutants. Sustainable agriculture reviews**, p.177- 201, 2009.

GONÇALVES, D. R. P.; SÁ, J.C.M.; MIRSHA, U.; FORNARI, A.J.; FURLAN, F. J. F.; FERREIRA, L. A.; INAGAKI, T.M.; ROMANIW, J.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; BRIEDIS, C. Conservation agriculture based on diversified and high-performance production system leads to soil carbon sequestration in subtropical environments. **Journal of Cleaner production**, p. 136-147, 2019.

HARTMAN, D. C. Dinâmica do carbono e agregação do solo influenciada pelo uso de fósforo em sistema integrado de produção agropecuária. **Universidade Estadual de Ponta Grossa**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), 2016.

HAYNES, R.J.; FRANCIS, G.S. Changes in microbial biomass-C, soil carbohydrate-composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. **Journal of Soil Science**, v.44, p.665–675, 1993.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Médias históricas em estações do IAPAR**. Disponível em http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Ponta_Grossa.htm . Acesso: 20 abr 2023.

INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? **Science Total Environmental**, p.523-532, 2017.

LIENHARD, P.; TIVET, F.; CHABANNE, A.; DEQUIEDT, S.; LELIEVRE, M.; SAYPHOUMMIE, S.; LEUDPHANANE, B.; PREVOST-BOURE, N. C.; SE´ GUY, L.; MARON, P.A.; RANJARD, L. No-till and cover crops shift soil microbial abundance and diversity in Laos tropical grasslands. **Agronomy for Sustainable Development**, v.33, p.375–384, 2013.

LI, J.; HUANG, L.; ZHANG, J.; COULTER, J.A.; LINGLING, L.; GAN, Y. Diversifying crop rotation improves system robustness. **Agronomy for Sustainable Development**, v.39, p. 2-13, 2019.

LIN, B. B. Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. **BioScience**, v.61, n.3, 2011.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M. Carbono e nitrogênio adicionados e sua relação com o rendimento do milho e estoques destes elementos no solo em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n.1, p. 175-187, 2004.

KHADEM, A.; RAIESI, F. Responses of microbial performance and community to corn biochar in calcareous sandy and clayey soils. **Applied Soil Ecology**, v. 114, p. 16-27, 2017.

KAPPES, C.; ZANCANARO, L. Manejo da fertilidade do solo em sistemas de produção no Mato Grosso. In **Congresso Nacional De Milho E Sorgo**, Vol. 3, p. 358-381, 2014.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. Integração lavoura-pecuária. **Embrapa Arroz e Feijão**, p.570, 2003.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, p. 638, 2006.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**, 2012.

MENDES, I. C.; CHAER, G. M.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; DANTAS, O. D.; OLIVEIRA, M. I. L.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: A mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. **Informações agronômicas: Nutrição de plantas, ciência e tecnologia**. Nº 8, dezembro, 2020.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, F. C. B. L.; LIMA, R. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; YANO, E. H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras, milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, 2013.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistema agrícolas, In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: **Genesis**, p. 1-8, 1999.

MISLEVY, P. Forages for grazing systems in warm climates. In: MCDOWELL, L. R. **Nutrition of grazing ruminants in warm climates**. Academic press, New York, 1985. Cap V, p.73-101.

MUZILLI, O. Princípios e perspectivas de expansão. In: **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, p.11-16 (Circular, 23), 1981.

NASCENTE, A. S.; CRUSCIOL, C. A. C. Cover crops and herbicide timing management on soybean yield under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.2, p.187-192, 2012.

NASCENTE, A. S.; LI, Y. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 130, p. 52-57, 2013.

NASCENTE, A. S.; SILVEIRA, P. M.; LOBO JUNIOR, M.; SANTOS, G. G.; CUNHA, P. C. R. Atributos químicos de latossolo sob plantio direto afetados pelo manejo do solo e rotação de culturas. **Revista Caatinga**, v.27, p.153-163, 2014.

NEGASSA, W.; DULTZ, S.; SCHLICHTING, A.; LEINWEBER, P. Influence of specific organic compounds on phosphorus sorption and distribution in a tropical soil. **Soil Science**, v.173, p.587-601, 2008.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1723-1724, 2008.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015**. Paris: 2015.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, 1992. 38p.

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.

VAN RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREE, C. A. Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional. **Análise química para avaliação da Fertilidades de solos tropicais**, p.5-39, 2001.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v.102, p.242- 254, 2009.

RHEINNHEIMER, D. S.; ALVAREZ, J. W. R.; OSÓRIO FILHO, B. D.; SILVA, L. S.; BORTOLUZZI, E. C. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.35, p.562-569, 2005.

RODRIGUES, M.; WINTHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil & Tillage Research**, v.205, 2021.

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

SÁ, J. C. M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P. C. F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, 2016.

SÁ, J. C. M.; GONÇALVES, D. R. P.; FERREIRA, L. A.; MISHRA, U.; INAGAKI, T. M.; FURLAN, F. J. F.; MORO, R. S.; FLORIANI, N.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A. O.; Soil carbon fractions and biological activity based indices can be used to study the impact of land management and ecological successions. **Ecological indicators**, n.84, p.96-105, 2018.

SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. M.; HERNANI, L. C. Integração lavoura-pecuária: alternativas de rotação de culturas. **Encontro Regional de Plantio Direto no Cerrado**, v.5, p.31-32, 2001.

SANTOS, N. Z.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MOLIN, R.; FAVARETTO N.; PAULETTI, V.; PIVA, J. T. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. **Soil & Tillage Research**, v.111, p.208-218, 2011.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; PIRES, J.; LAMPERTO, E. A.; VARGAS, A. M.; VERDI, A. C. Grain yield and agronomic traits in soybean according to crop rotation systems. **Bragantia**, v.73, p.319-326, 2014.

SANTOS, G. A. A.; MOITINHO, M. R.; SILVA, B. O.; XAVIER, C. V.; TEIXEIRA, D. B.; CORÁ, J. E.; LA SCALA JUNIOR, N. Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO₂ emission. **Science of the Total Environment**, v.686, p.413-424, 2019.

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

SCHOENAU, J. J.; MAHLI, S. S. Sulfur forms and cycling processes in soil and their relationship to Sulfur Fertility. **Agronomy Monography**, p.1–10, 2015.

SCHOO, B.; WITTICH, K.P.; BÖTTCHER, U.; KAGE, H.; SCHITTENHELM, S. Drought tolerance and water-use efficiency of biogas crops: A Comparison of Cup Plant, Maize and Lucerne- Grass. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.203, p.117-130, 2017.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; REIS, M. S.; Origem, Evolução e Importância Econômica. In: SEDIYAMA T, (Ed.). **Tecnologia de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenas, p. 1-5, 2009.

SILVA, V. L.; DIECKOW, J.; MELLEK, J. E.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; VEZZANI, F. M.; Melhoria da Estrutura de um Latossolo por Sistemas de Culturas em Plantio Direto nos Campos Gerais do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.983-992, 2012.

SILVEIRA NETO, A. N.; SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Efeitos de manejo e rotação de culturas em atributos físicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 1, p.29-35, 2006.

SIQUEIRA NETO, M. Mineralização e desnitrificação do nitrogênio no solo sob sistema plantio direto. **Revista Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 923-936, 2010.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHAN, R.; ALBES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODEY, R.M.. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.76, p.39-58, 2004.

SOUSSANA, J. F.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.190, p.9-17, 2014.

SOUZA, C. M. de. et al. Adubação verde e rotação de culturas. **Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, p.108, 2012.

STEMPKOWSKI, L. A.; PEREIRA, F. S.; VALENTE, J. B.; FARIAS, M.; BORBA, M. C.; DALMAGO, G. A.; SANTI, A.; LAU, D.; KUHNEM, P.; CASA, R. T.; SILVA, F. N. Impacto da rotação de culturas sobre o masaico-comum do trigo. In: **Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale**, Passo Fundo. Atas e resumos, v.12, p.327-331, 2019.

STOTT, D. E.; ANDREWS, S. S.; LIEBIG, M. A.; WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L. Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v.74, n.1, p.107– 119, 2010.

STURMER, S. L. K.; ROSSATO, S. B.; COPETTI, A. C. C.; SANTOS, D. R.; CALEGARI, A.; BRUM, B. Variações nos teores de Carbono orgânico em função do desmatamento e revegetação natural do solo. **Ciência Florestal, Santa Maria**, v.21, p.241-250, 2011.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.34, p.225–229, 1970.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. **Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties**. Soil Science Society of America, 1994. Cap. 37, p.775-833.

THOMAS, R. J.; ASAKAWA, N.M. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. **Soil Biology and Biochemistry**, v.25, p.1351–1361, 1993.

TIECHER, T. L.; CERETTA, C. A.; COMIN, J. J.; GIROTTO, E.; MIOTTO, A.; DE MORAES, M. P.; BENEDET, L.; FERREIRA, P. A. A.; LORENZI, C. R.; COUTO, R.; BRUNETTO, G. Forms and accumulation of copper and zinc in a sandy typic hapludalf soil after longterm application of pig slurry and deep litter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.812–824, 2013.

TIVET, F.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; BORSZOWSKEU, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; SÁ, M. F. M.; HARTMAN, D. C.; EURICH, G.; FARIAS, A.; BOUZINAC, S.; SÉGUY, L. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**, 209-210, 214-225, 2013.

UZOH, I. M.; IGWE, C. A.; OKLEBALAMA, C. B.; BABALOLA, O. O. Legume-maize rotation effect on maize productivity and soil fertility parameters under selected agronomic practices in a sandy loam soil. **Scientific Reports**, v.9, 2019.

VENDRAME, P. R. S. et al. Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na região do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 859-864, 2007.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.35, n.1, p.213-223, 2011.

WEIL, R. R.; ISLAM, K. R.; STINE, M. A.; GRUVER, J. B.; SAMSON-LIEBIG, S. E. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agronomy**. 18:3-17. 2003.