

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIENCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
CURSO DE AGRONOMIA

HELOISA MACHADO DA MOTA

**APORTE DE CARBONO E DE NUTRIENTES COM O USO DE POLIHALITA
EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**

PONTA GROSSA – PR

2026

HELOISA MACHADO DA MOTA

**APORTE DE CARBONO E DE NUTRIENTES COM O USO DE POLIHALITA
EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para
obtenção de título de Engenheiro Agrônomo na
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires.

PONTA GROSSA – PR

2026



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
COLEGIADO DO CURSO DE AGRONOMIA
COORDENAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OTCC - Ano 2026

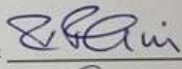
AVALIAÇÃO DE TCC
RELATÓRIO DA BANCA EXAMINADORA


Título da Monografia: APORTE DE CARBONO E DE NUTRIENTES COM O USO DE POLIHABILITA EM SISTEMA PLANTIO DIRETO


Autor (a): HELOISA MACHADO DA MOTA

Data da defesa: 22/05/2026 Horário: 15:20h Local: SALA F-41

Avaliadores:

1-Orientador (a): EDUARDO FAVERO CAIRES Assinatura: 

2-Avaliador (a): REGIANE K. BECKER Assinatura: 

3-Avaliador (a): RAFAEL MAZER ETTO Assinatura: 

Itens a serem avaliados	Notas atribuídas		
	Orientador(a)	1º Avaliador(a)	2º Avaliador(a)
I- Apresentação oral (Até 2,0)	1,9	2,0	1,9
II- Trabalho escrito (Até 6,0)	5,7	5,8	5,9
III- Arguição (Até 2,0)	1,5	2,0	1,9
TOTAL	9,1	9,8	9,7
MÉDIA FINAL *	9,5 + 0,5 = 10,0		

* Orientador(a) nota final com uma casa após a vírgula

Atenção Professor(a) ORIENTADOR(A):

No caso de apresentação de trabalho, em evento técnico-científico, no qual o acadêmico conste como autor, poderá ser acrescentado **ATÉ 10%** da nota, na somatória final. Apresentar **comprovante** junto com os documentos entregues para a Coordenação de TCC.

FORMULÁRIO 4
OTCC
AGRONOMIA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sobretudo, a Deus, pelo dom da vida, por toda a força que me concedeu nos momentos de dificuldade e por cada instante, ao longo deste caminho, em que fui preenchida de alegria. Sou grata por todo o amparo durante os anos em que frequentei a Universidade Estadual de Ponta Grossa e por toda a condução deste trabalho.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, Isaias e Cristiane, e à minha irmã, Rosana, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando, incentivando e oferecendo todo o auxílio necessário para que meus objetivos se tornassem possíveis. Se hoje estou aqui, é por todo o suporte que veio de vocês.

Agradeço ao meu orientador, Eduardo Fávero Caires, que me acolheu com carinho e paciência no Laboratório de Fertilidade do Solo durante todos os anos em que estive na graduação, proporcionando-me a oportunidade de adquirir conhecimento e crescer profissionalmente.

Agradeço a cada pessoa que contribuiu, de alguma forma, para a minha trajetória, especialmente as colegas de turma Briena e Julia, que tornaram esse período mais leve e divertido e que também estiveram comigo nos momentos delicados.

À equipe do Laboratório de Fertilidade do Solo, sou extremamente grata a cada um dos colegas dessa equipe, tanto pelas contribuições no desenvolvimento das minhas atividades quanto, sobretudo, pela amizade construída ao longo desses anos. Agradeço especialmente a Maria Leticia de Cristo, Murilo Rodrigues, Giuliano Brustolin Rigoni, Rhelmmer Schuartz, Yasmin Reda e Leonardo Borato assim como a todos os demais.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), à Fazenda Escola “Capão da Onça”, aos docentes, coordenadores e demais servidores, meu sincero agradecimento.

À agência de fomento CNPq, pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

E a todos que, de algum modo, contribuíram para a minha formação, minha eterna gratidão.

RESUMO

MOTA H. M. **Aporte de carbono e de nutrientes com o uso de polihalita em sistema de plantio direto.** Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires. Ponta Grossa, 2026. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2026.

O sistema plantio direto com rotação diversificada de culturas tem sido considerado uma das estratégias mais eficazes para melhorar a sustentabilidade da agricultura e minimizar perdas de solo e nutrientes por erosão em regiões tropicais e subtropicais. A acidez subsuperficial de solos sob plantio direto é um sério impedimento para o crescimento do sistema radicular das plantas e o aporte de carbono (C) ao longo do perfil. O gesso agrícola é amplamente utilizado para a melhoria do ambiente radicular no subsolo. As aplicações de calcário e gesso se constituem em estratégias eficientes para melhorar a atividade biológica, o estoque de C, o desempenho fisiológico das plantas e a produtividade das culturas. A polihalita é um fertilizante potássico alternativo que, além de potássio (K), contém cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na forma de sulfato. Este trabalho teve como objetivo avaliar o aporte de C e de nutrientes (Ca, Mg, K e S) no sistema de produção sob plantio direto com o uso de polihalita. O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho distrófico, sob sistema plantio direto, na Fazenda Escola “Capão da Onça”, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, PR. Utilizou-se o delineamento em blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de um controle (com KCl) e de aplicações de gesso agrícola (com KCl), polihalita em cada cultura (trigo, soja e milho) e polihalita em dose total antecipada nas culturas de trigo, soja e milho. As avaliações foram realizadas após dois ciclos sequenciais da sucessão trigo-soja-aveia preta-milho. A aveia preta foi cultivada para produção de biomassa visando cobertura do solo, sem fertilizantes. Por meio de avaliações do aporte de C pela biomassa das culturas, das atividades das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, e dos estoques de C orgânico e de nutrientes no solo foi avaliado o potencial da polihalita no aporte de C e nutrientes em sistema plantio direto. O uso de polihalita demonstrou proporcionar incremento de C da biomassa das culturas por meio de aumento na produtividade acumulada de grãos, resultando em correlação positiva com estoque de C orgânico total do solo, embora sem acréscimos estatisticamente significativos entre os tratamentos. A atividade da enzima β -glicosidase foi maior com a aplicação de gesso e a atividade da enzima arilsulfatase não foi influenciada pelos tratamentos. O uso de polihalita demonstrou potencial para aumentar o aporte de C da biomassa das culturas e o estoque C orgânico total e de nutrientes, especialmente S, no solo.

Palavras-chave: Subsolo ácido, alumínio, gesso agrícola, adubação, sequestro de carbono.

ABSTRACT

MOTA H. M. **Carbon and nutrient input with the use of polyhalite in a no-till system.** Advisor: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires. Ponta Grossa, 2026. Undergraduate Thesis - State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa 2026.

No-till farming with diversified crop rotation has been considered one of the most effective strategies for improving agricultural sustainability and minimizing soil and nutrient losses due to erosion in tropical and subtropical regions. Subsoil acidity under no-till farming is a serious impediment to plant root system growth and carbon (C) input throughout the profile. Gypsum is widely used to improve the root environment in the subsoil. Applications of limestone and gypsum constitute efficient strategies to improve biological activity, C stock, plant physiological performance, and crop yield. Polyhalite is an alternative fertilizer that, in addition to potassium (K), contains calcium (Ca), magnesium (Mg), and sulfur (S) in the form of sulfate. This study aimed to evaluate the input of C and nutrients (Ca, Mg, K, and S) in a no-till production system using polyhalite. The experiment was conducted in a dystrophic Red Latosol under a no-till system at the "Capão da Onça" School Farm of the State University of Ponta Grossa, Parana State, Brazil. A randomized block design was used, with four treatments and four replications. The treatments consisted of a control (with KCl) and applications of gypsum (with KCl), polyhalite in each crop (wheat, soybean, and corn), and polyhalite in a total rate applied in advance to wheat, soybean, and corn crops. Evaluations were performed after two sequential cycles of the wheat–soybean–black oat–corn succession. Black oat was grown for biomass production as a cover crop, without fertilizers. Through evaluations of C input by crop biomass, β -glucosidase and arylsulfatase enzyme activities, and organic C and nutrient stocks in the soil, the potential of polyhalite in supplying C and nutrients in a no-till system was assessed. The use of polyhalite showed potential to increase crop biomass carbon through enhanced cumulative grain yield, resulting in a positive correlation with total soil organic carbon stocks, although no statistically significant differences were observed among treatments. The activity of the β -glucosidase enzyme was higher with the application of gypsum, and the activity of the arylsulfatase enzyme was not influenced by the treatments. The use of polyhalite demonstrated potential to increase the supply of C in crop biomass and the total organic C and nutrient stock, especially S, in the soil.

Keywords: Subsoil acidity, aluminum, gypsum, fertilization, carbon sequestration.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- Precipitação pluvial e temperatura do ar média mensal durante o período de cinco anos de execução do experimento. Safras de 2018 a 2022, Ponta Grossa-PR.	24
FIGURA 2	- Produtividade acumulada de grãos das culturas de milho, trigo e soja em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR	30
FIGURA 3	- Aporte de carbono da biomassa dos resíduos das culturas em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR	
FIGURA 4	- Estoque de C extraído por água quente no perfil do solo (0–60 cm) em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR	31
FIGURA 5	- Estoque de C oxidável em permanganato no perfil do solo (0–60 cm) em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR	32
FIGURA 6	- Aporte de C orgânico total no perfil do solo (0–60 cm) em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR	34
FIGURA 7	- Relação entre o aporte de C da biomassa dos resíduos das culturas e o estoque de C orgânico total no perfil do solo (0–60 cm) em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR	34

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1 - Atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase na camada superficial do solo (0–10 cm) em função dos tratamentos com gesso e aplicação de polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR. 36
- TABELA 2 - Estoques de nutrientes do perfil do solo (0-60 cm), em função da aplicação de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR 37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	AGRICULTURA DE CONSERVAÇÃO	9
2.2	SISTEMA PLANTIO DIRETO	10
2.3	ROTAÇÃO DIVERSIFICADA DE CULTURAS	12
2.3.1	Soja	12
2.3.2	Milho	13
2.3.3	Aveia Preta	14
2.3.4	Trigo	15
2.4	GEDSO AGRÍCOLA	15
2.5	POLIHALITA	17
2.6	MATÉRIA ORGÂNICA	18
2.7	ENZIMAS DO SOLO	20
3	OBJETIVOS	22
3.1	OBJETIVO GERAL	22
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4	HIPÓTESES	23
5	MATERIAL E MÉTODOS	24
5.1	LOCAL DO EXPERIMENTO	24
5.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	25
5.3	AVALIAÇÕES	26
5.4	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	27
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6.1	PRODUTIVIDADE ACUMULADA DE GRÃOS	28
6.2	APORTE DE CARBONO DA BIOMASSA DAS CULTURAS	29
6.3	ESTOQUE DE CARBONO EXTRAÍDO EM ÁGUA QUENTE	31
6.4	ESTOQUE DE CARBONO OXIDÁVEL EM PERMANGANATO	32
6.5	ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL	33
6.6	ATIVIDADE ENZIMÁTICA	35
6.7	ESTOQUE DE NUTRIENTES DO SOLO	37
7	CONCLUSÕES	38
8	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O manejo adequado do solo, o uso eficiente de insumos e a adoção do sistema plantio direto têm se tornado cada vez mais relevantes nos sistemas de cultivo, especialmente por favorecerem o sequestro de carbono (C) e a melhoria da estrutura do solo (Follett, 2001). Entre essas práticas, o sistema plantio direto tem se destacado como uma das estratégias mais eficientes para aumentar a sustentabilidade da agricultura (Derpsch, 2008; Dang *et al.*, 2020). Em escala global, esse sistema se consolidou como um dos principais pilares da intensificação sustentável da agricultura, ao conciliar produtividade e redução de impactos ambientais (Kassam; Friedrich, 2012).

O sistema plantio direto é caracterizado pela ausência de operações de preparo do solo, com a semeadura realizada sem revolvimento, manutenção dos resíduos culturais na superfície e adoção da rotação de culturas (Dang; Dalal; Menzies, 2020). Esse sistema é capaz de promover maior aporte de resíduos vegetais na superfície e reduzir a mobilização mecânica do solo aumentando o conteúdo de matéria orgânica. Tais características tornam o sistema plantio direto especialmente relevante para solos fortemente intemperizados, como Latossolos e Argissolos, predominantes no território brasileiro (Sá *et al.*, 2014).

A acidez do solo se constitui em um dos principais fatores limitantes da produção agrícola em solos de regiões tropicais e subtropicais, uma vez que ela interfere na disponibilidade de nutrientes e pode aumentar a toxicidade de determinados elementos (Fageria; Nascente, 2014). O gesso agrícola é amplamente utilizado como fonte de cálcio (Ca) e enxofre (S), e age como condicionador do solo, contribuindo para a mitigação de limitações associadas à acidez do perfil, ao reduzir a toxidez por alumínio (Al) em camadas subsuperficiais e promover melhores condições para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Vicensi *et al.*, 2020; Gashi *et al.*, 2025). Estudos indicam que a aplicação de calcário e gesso em sistema plantio direto pode aumentar os estoques de C orgânico do solo, principalmente em função do aumento da disponibilidade de Ca que favorece a atividade biológica e a estabilização da matéria orgânica (Inagaki *et al.*, 2016).

Devido à sua sensibilidade às alterações ambientais e ao manejo agrícola, as enzimas do solo destacam-se como indicadores eficientes da qualidade do solo (Karaca *et al.*, 2010). A β -glicosidase é uma enzima conhecida por sua aquisição microbiana de C, pois está envolvida na decomposição da celulose (Xiao *et al.*, 2021). A enzima arilsulfatase, por sua vez, está envolvida no ciclo do S e está diretamente correlacionada com o C orgânico do solo (Tabatabai; Bremner, 1970). Em um estudo de longa duração em sistema plantio direto, Inagaki *et al.* (2016)

verificaram que as atividades das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase foram indicadores eficazes para avaliar os efeitos de longo prazo decorrentes de aplicações de calcário e gesso, e que as mudanças nas formas lábeis de C orgânico no solo (C extraído em água quente e C oxidável em permanganato) foram os fatores que mais influenciaram as atividades dessas enzimas.

A polihalita ($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$) é uma fonte alternativa natural de potássio (K) que também contém Ca e magnésio (Mg) e S, na forma de sulfato, em sua composição (Adak; Sengupta, 2024). O cloreto de potássio (KCl) domina o mercado brasileiro e mundial de fertilizantes potássicos e o Brasil importa 95% de todo o KCl utilizado em sua agricultura (Barbosa *et al.*, 2025). Esse cenário de alta dependência de uma única fonte representa um risco adicional para a sustentabilidade da atividade agrícola. Portanto, torna-se cada vez mais necessário estudar fontes alternativas solúveis de K, mesmo que importadas, como a polihalita (Oliveira *et al.*, 2026). Este trabalho teve a finalidade de avaliar se o uso de polihalita melhora o aporte de C e de nutrientes (Ca, Mg, K e S) em sistema plantio direto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGRICULTURA DE CONSERVAÇÃO

Com o crescimento populacional e a demanda elevada por alimentos, a agricultura tem assumido um papel cada vez mais relevante (Yaqoob *et al.*, 2023). A intensificação da produção agrícola tem sido acompanhada por diversos desafios, incluindo mudanças climáticas, degradação do solo por erosão, compactação, esgotamento e poluição dos recursos hídricos, o que tem comprometido significativamente a capacidade produtiva dos sistemas agrícolas (Velten *et al.*, 2015; Nuruzzaman; Bahar; Naidu, 2025).

A emissão de gases de efeito estufa (GEE) representa um dos maiores desafios da atualidade, devido ao seu alto potencial de provocar alterações climáticas globais. O setor agrícola tem sido apontado como responsável por cerca de 12% das emissões de GEE de origem antropogênica (Chataut *et al.*, 2023). Tais emissões estão diretamente relacionadas a práticas de manejo inadequadas, como o uso intensivo de fertilizantes, tanto inorgânicos quanto orgânicos, a queima de combustíveis fósseis em operações agrícolas, bem como a incineração de resíduos orgânicos (Yue *et al.*, 2017; Zaman; Heng; Müller, 2021).

Embora os solos possam atuar como fontes de emissão de GEE, também apresentam potencial para atuar como sumidouros desses gases (Kopittke *et al.*, 2024). Os solos apresentam uma capacidade de armazenar cerca de três a quatro vezes mais C do que a vegetação e a atmosfera conjuntamente (Shakoor *et al.*, 2021). De acordo com Besen *et al.* (2024), práticas agrícolas adequadas podem reduzir a perturbação do solo, diminuindo a frequência e intensidade do cultivo, o que, por sua vez, reduz a perda de C e favorece o seu armazenamento. Além disso, a manutenção de cobertura vegetal permanente contribui para o aumento da fixação de C no solo, tornando o ciclo mais fechado e eficiente (Jian *et al.*, 2020).

As mudanças climáticas associadas às atividades humanas têm intensificado a emissão de gases de efeito estufa e agravado processos de degradação e perda de fertilidade do solo (Xiong *et al.*, 2024). Em regiões de clima tropical e subtropical úmido, esses impactos têm se tornado ainda mais expressivos, uma vez que a alta acidez, o elevado teor de Al trocável e a baixa fertilidade natural do solo já constituem limitações importantes à produção agrícola (Abreu Jr.; Muraoka; Lavorante, 2003).

A intensificação agrícola baseada em práticas convencionais tem contribuído para declínios progressivos na qualidade do solo, especialmente nas últimas décadas (Rodriguez *et al.*, 2022). A baixa fertilidade do solo está associada principalmente à erosão, ao esgotamento

de nutrientes, à aração contínua e ao baixo aporte de matéria orgânica, sendo agravada pela redução do uso de corretivos e de fertilizantes orgânicos, o que compromete a estrutura do solo, intensifica a lixiviação e acelera a degradação das terras (Ndegwa *et al.*, 2023).

A agricultura de conservação emergiu a partir da necessidade de repensar práticas agrícolas convencionais, como a aração intensiva, em razão de seus impactos negativos sobre a qualidade e a funcionalidade do solo (Francaviglia; Almagro; Vicente-vicente, 2023). Nesse contexto, a agricultura conservacionista consolidou-se como uma alternativa sustentável de produção, baseada na redução da perturbação mecânica do solo por meio do plantio direto ou do cultivo mínimo, na manutenção de cobertura orgânica permanente com resíduos culturais ou culturas de cobertura, e na diversificação dos sistemas produtivos por meio de rotações e consórcios de culturas (Hobbs; Sayre; Gupta, 2007, Giller *et al.*, 2015).

2.2 SISTEMA PLANTIO DIRETO

O sistema plantio direto se caracteriza como uma prática de manejo do solo que preconiza três preceitos fundamentais (Thapa; Dura, 2024). Dentre eles, estão a mínima mobilização do solo, que geralmente está limitada apenas à linha de semeadura, a manutenção de uma cobertura vegetal morta sobre a superfície, conhecida como palhada, e a adoção de um esquema de rotação entre diferentes culturas ao longo do tempo (Embrapa, 2019).

Historicamente, uma parcela significativa dos sistemas agrícolas baseou-se na monocultura, caracterizada pelo cultivo contínuo de uma única espécie vegetal em uma mesma área ao longo de sucessivos ciclos produtivos (Zou *et al.*, 2024). Apesar do sistema parecer uma boa prática para a utilização de culturas de alto rendimento, a monocultura pode resultar em danos ao solo por meio do esgotamento de nutrientes, erosão e redução da matéria orgânica, ou ainda pode torná-lo suscetível ao ataque de pragas e doenças (Balet; Yadete, 2023). Em contraposição ao monocultivo, o sistema de rotação diversificada de culturas consiste em uma técnica que busca utilizar pelo menos três culturas durante ciclos sucessivos de semeadura (Shah *et al.*, 2021).

A rotação de culturas é amplamente reconhecida pelos múltiplos benefícios que proporciona aos sistemas agrícolas, destacando-se a melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, a redução da dependência de fertilizantes minerais e os efeitos positivos sobre a produtividade das culturas (Wang *et al.*, 2023). Esses benefícios decorrem da utilização de diferentes espécies vegetais, com exigências nutricionais e sistemas radiculares distintos que favorecem a deposição de biomassa radicular, modificam os exsudatos radiculares

e melhoram a qualidade dos resíduos vegetais incorporados ao solo (Zou *et al.*, 2024). Além disso, a rotação de culturas contribui para a redução do esgotamento do solo e para a restauração natural de nutrientes, uma vez que possibilita a alternância com culturas leguminosas capazes de estabelecer relações simbióticas com microrganismos fixadores de nitrogênio (N) (Al-Musawi; Vona; István, 2025).

A sequência de culturas, por apresentar grande potencial para a produção de resíduos vegetais, contribui para o aumento da matéria orgânica do solo (Fontana *et al.*, 2024). Desse modo, a diversidade de resíduos do solo causada pela rotação de culturas pode ser uma razão para o aumento da diversidade microbiana, visto que o exsudato radicular e a serapilheira de culturas podem fornecer substratos de C residual, o que favorece o crescimento de diversos microrganismos do solo (Garbeva; Van Veen; Van Elsas, 2004).

O uso de plantas como cobertura do solo é outro fator fundamental do sistema plantio direto, alternativa na qual as espécies vegetais cultivadas apresentam finalidades que vão além da produção primária de grãos ou forragem, sendo utilizadas principalmente para proteger e melhorar as propriedades do solo durante os períodos entre os ciclos regulares de cultivo anual (Koudahe; Allen; Djaman, 2022). As culturas de cobertura podem ser classificadas de acordo com sua função nos sistemas agrícolas, podendo atuar como coberturas vivas ou ainda ser utilizadas como adubo verde após a incorporação da biomassa ao solo. Além disso, essas culturas também podem ser agrupadas conforme o tipo de vegetação, incluindo gramíneas, leguminosas e espécies dicotiledôneas não leguminosas (Yousefi; Dray; Ghazoul, 2024).

A escolha das espécies utilizadas como cobertura contribui para a eficiência do sistema produtivo. De modo geral, as leguminosas produzem biomassa com alto teor de N e baixa relação C/N, o que favorece rápida decomposição e liberação de nutrientes no solo (Lu *et al.*, 2000). Já as gramíneas apresentam alta relação C/N, decompõem-se mais lentamente e contribuem principalmente para maior acúmulo e permanência de biomassa no solo (Nurbekov *et al.*, 2024). Desse modo, a cobertura vegetal aprimora o fornecimento de diversos serviços ecossistêmicos em agroecossistemas, destacando-se os efeitos positivos sobre a retenção de nutrientes e o acúmulo de matéria orgânica do solo, decorrentes da produção e deposição de resíduos vegetais (Daryanto *et al.*, 2018).

As práticas convencionais de cultivo causam alterações na estrutura do solo, modificando a densidade aparente, podendo aumentar a compactação dos solos (Okorie; Niraj, 2022). Com a adoção do sistema plantio direto, essas práticas foram substituídas por uma técnica de semeadura realizada sem preparo prévio do solo ou com mínima perturbação, preservando a estrutura do solo. Dessa forma, esses sistemas de manejo promovem a

conservação e a melhoria da qualidade do solo, além de poderem gerar benefícios econômicos em longo prazo, como a redução dos custos com insumos e operações de manejo (Dewi *et al.*, 2022; Possamai *et al.*, 2022).

2.3 ROTAÇÃO DIVERSIFICADA DE CULTURAS

Abordagens inovadoras, como os sistemas agrícolas integrados com rotação diversificada de culturas, surgiram para enfrentar os desafios da produção de alimentos e da sustentabilidade ambiental, atendendo à crescente demanda por alimentos vegetais saudáveis e contribuindo para o aumento da renda dos agricultores (Yang *et al.*, 2024).

O Brasil destaca-se como um dos principais produtores e exportadores agrícolas do mundo. Em 2026, o país consolidou sua posição ao abastecer o mercado interno e contribuir para a segurança alimentar mundial (MAPA, 2026). De acordo com o IBGE (2026), a safra brasileira de grãos no ciclo de 2025 se encerrou com estimativa de colheita de 346,1 milhões de toneladas e, com isso, registrou um novo recorde na série histórica. Entre as culturas mais produzidas se destacaram a soja e o milho (IBGE 2026b).

2.3.1 Soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merr.), originária do Leste Asiático, destaca-se como a leguminosa de maior relevância global, cujas sementes apresentam teor de óleo entre 18% e 23% e proteína variando de 38% a 44% em base livre de umidade (Mishra *et al.*, 2024). A proteína de soja é reconhecida como de elevada qualidade nutricional, associada a benefícios à saúde, em função de sua composição rica em aminoácidos essenciais, vitaminas, flavonoides e polissacarídeos (Casarotto *et al.*, 2025).

A soja é amplamente utilizada como fonte de proteína e de óleo vegetal na alimentação humana, destacando-se por seu alto valor nutricional e sua acessibilidade (Ateye *et al.*, 2025). Além disso, o óleo de soja é considerado um produto de grande relevância, sendo rico em ácidos graxos polinsaturados, especialmente o ácido linoleico (Fang; Kong; 2022). Após a extração de óleo, o resíduo desse produto segue como fonte de aminoácidos altamente digestíveis, estimando-se que apenas 2% da farinha de soja seja destinada para alimentação e os 98% restantes utilizados para a nutrição de animais (Ondulla *et al.*, 2023).

O Brasil foi o maior produtor mundial de soja na safra 2024/2025, e a cultura ocupou uma área de 47,61 milhões de hectares. Os Estados Unidos também apresentaram elevada

produção do grão no mesmo período, destacando-se entre os principais produtores mundiais de soja (Embrapa, 2025). De acordo com dados de Conab (2026a), o Brasil teve produção estimada em 176,1 milhões de toneladas nessa última safra, sendo 2,7% superior à safra passada.

Em função da elevada concentração de proteínas nos grãos, a soja possui alta demanda por N, a qual é atendida predominantemente pela interação com bactérias que realizam a fixação biológica do N₂, além da contribuição do N mineral fornecido no solo (Ciampitti *et al.*, 2021). A fixação biológica de N₂, além de se demonstrar eficiente para incrementos de biomassa das sementes e ganhos produtivos, também contribui para a melhoria da capacidade produtiva do solo, uma vez que favorece a reciclagem de nutrientes. Nesse contexto, a alternância com espécies forrageiras, gramíneas e leguminosas torna-se fundamental para a sustentabilidade do sistema agrícola (Filho; Filho, 2021; Ciampitti; Salvagiotti, 2018).

2.3.2 Milho

O milho (*Zea mays* L.) foi domesticado há mais de 9.000 anos no sul do México/Mesoamérica e, após a colonização europeia das Américas, difundiu-se rapidamente em escala global, tornando-se um dos principais cereais cultivados no mundo em termos de produção e importância alimentar (Erenstein *et al.*, 2022). O milho apresenta ampla versatilidade de uso, sendo empregado na alimentação humana, animal e em aplicações industriais (Shah *et al.*, 2016). Embora a cultura do milho esteja inserida em diversas cadeias produtivas, sua principal destinação está vinculada à produção animal, consolidando o milho como uma das principais commodities agrícolas nas últimas décadas (Bernardes; Rêgo, 2014). Além disso, o milho produz uma grande quantidade de resíduos agrícolas anualmente, refletindo seus elevados níveis de produção de biomassa em comparação com outras culturas. Nesse contexto, a biomassa celulósica derivada desses resíduos agrícolas constitui uma importante alternativa para a produção adicional de etanol (Dhugga *et al.*, 2007).

A produção mundial de milho concentra-se majoritariamente nos EUA que lideram o ranking global. Na sequência, destacam-se a China, como segunda maior produtora, e o Brasil que ocupa a terceira posição entre os principais produtores do cereal (FAOSTAT, 2025). A produção total de milho estimada no ano 2025/2026 no Brasil foi de 138,6 milhões de toneladas (Conab, 2026a).

As mudanças nas práticas culturais foram responsáveis por uma significativa parcela dos ganhos na produtividade de milho, entre elas, o uso de fertilizantes sintéticos nitrogenados que aumentou significativamente a partir dos anos após a Segunda Guerra Mundial (Duvick,

2005). A partir disso, a intensificação agrícola resultou em sistemas de produção altamente dependentes de insumos externos, incluindo fertilizantes, defensivos agrícolas e cultivares geneticamente modificados (Leitschuh; Stewart; Van Riper, 2022).

A integração planejada das culturas de milho e aveia no sistema de rotação oferece alto potencial de produção de fitomassa e uma relação C/N elevada, assegurando a manutenção da cobertura do solo conforme a quantidade mínima recomendada e por um período prolongado na superfície (Filho; Filho, 2021). Além disso, o cultivo do milho em rotações mais diversificadas pode alterar a arquitetura radicular, aumentando a profundidade de enraizamento e a exploração de recursos do solo, o que pode resultar em maior produtividade de grãos (Nichols *et al.*, 2024).

2.3.3 Aveia Preta

A origem da aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) se deu na Península Ibérica, de onde se espalhou para a Europa Ocidental e Central, ocupando diversos nichos ecológicos (Ugrenović *et al.*, 2021). A aveia é uma planta anual, típica de climas temperados e subtropicais, com crescimento ereto, uniforme e boa capacidade de perfilhos (Kichel; Miranda, 2000). Essa cultura se caracteriza por apresentar exigências edafoclimáticas moderadas, sendo tolerante à seca, à acidez e aos baixos níveis de fertilidade do solo, além de se adaptar bem em solos arenosos e argilosos, embora apresente menor resistência às temperaturas muito baixas (Ugrenović *et al.*, 2021).

A aveia preta é cultivada para diferentes finalidades, incluindo produção de grãos, pastagem, forragem, cobertura do solo e rotação de culturas, variando conforme a região. Tradicionalmente, é utilizada como ração animal para equinos, bovinos, aves e ovinos, sendo apenas uma pequena parcela da produção destinada ao consumo humano (Boczkowska; Podyma; Lapiński, 2016). Os grãos desta espécie têm alto valor nutricional, ou seja, contêm 27–52% mais proteína, 14–27% mais gordura e 38–72% mais polissacarídeos do que a aveia comum (Podyma *et al.*, 2019).

A aveia-preta destaca-se como importante planta de cobertura por sua elevada produção de biomassa e alta relação C/N, o que resulta em menor velocidade de decomposição dos resíduos vegetais, maior permanência da palhada no solo e liberação gradual de nutrientes (Bortolini; Silva; Argenta, 2000). De modo geral, as plantas de cobertura exercem papel fundamental na ciclagem de nutrientes, tanto daqueles provenientes de fertilizantes minerais não aproveitados pelas culturas comerciais quanto daqueles oriundos da mineralização da

matéria orgânica e do próprio material de origem do solo (Amado; Santi; Acosta, 2003). Além disso, o cultivo da aveia-preta, devido ao seu potencial alelopático, contribui para a redução da infestação de plantas invasoras, especialmente aquelas de folhas estreitas, diminuindo os custos associados ao seu controle e favorecendo o desempenho das culturas subsequentes (Luiz, 2000; Hagemann *et al.*, 2010).

2.3.4 Trigo

O trigo (*Triticum aestivum L.*) é uma espécie pertencente à família Poaceae e à tribo Triticeae, cuja domesticação ocorreu na região do Crescente Fértil, no Oriente Médio, a partir da qual a cultura se disseminou para diferentes partes do mundo, consolidando-se principalmente em regiões de clima temperado como uma das principais culturas anuais (Snape; Pánková, 2013). O trigo ocupa posição central na alimentação humana e é principalmente processado na forma de farinha para diferentes produtos alimentícios, como pães, massas e biscoitos, sendo as características do grão o fator que orienta sua destinação industrial (Embrapa, 2017).

Aproximadamente 35% da população mundial tem o trigo como elemento central de sua alimentação, e mais de dois terços da produção global desse cereal são destinados ao consumo humano, ao passo que cerca de um quinto é utilizado como ração animal (Grote *et al.*, 2021). Do ponto de vista nutricional, a sua composição trata-se principalmente de carboidratos, proteínas, fibras, diversas vitaminas (particularmente vitaminas do complexo B), cálcio, ferro e uma variedade de macro e micronutrientes (Igrejas *et al.*, 2020).

A colheita do trigo da safra 2025 foi finalizada com produção de 7,9 milhões de toneladas e, apesar da redução de 20% na área cultivada em relação à safra anterior, o resultado foi positivo, já que o clima contribuiu para a obtenção de boas produtividades (Conab, 2026a). Além disso, rotações de culturas envolvendo trigo e milho associadas com outras espécies vêm se destacando na promoção da produtividade e da fertilidade do solo, devido ao aumento do C orgânico, à melhoria da atividade enzimática e à otimização da ciclagem de nutrientes (Yang *et al.*, 2025).

2.4 GESSO AGRÍCOLA

Os solos brasileiros são naturalmente ácidos e carentes de nutrientes essenciais para as plantas em razão de fatores pedogenéticos e do intenso intemperismo (Fageria; Baligar, 2007).

Além dos fatores naturais, a acidificação dos solos tem sido intensificada por ações antrópicas e processos ambientais, incluindo o uso inadequado de fertilizantes nitrogenados, a deposição atmosférica ácida e alterações nas propriedades físicas e químicas do solo associadas à decomposição de resíduos vegetais (Tóth *et al.*, 2020). A adequação das condições químicas e físicas das camadas subsuperficiais do solo pode contribuir para o aumento ou a maior estabilidade da produtividade das culturas, sobretudo em ambientes caracterizados por invernos secos e ocorrência de déficits hídricos (Borges *et al.*, 2022).

O sistema plantio direto com rotação diversificada de culturas representa uma estratégia eficaz para promover a sustentabilidade agrícola, especialmente em regiões tropicais e subtropicais, onde os desafios de manejo do solo são maiores (Caires *et al.*, 2011). A aplicação de calcário em solos ácidos, combinada com outras práticas para melhorar a fertilidade e o manejo do solo, visa aumentar a capacidade produtiva desses solos (Caires; Banzatto; Fonseca, 2000). A correção da acidez por meio da calagem promove aumento no pH, nos teores de Ca e Mg, e na saturação por bases, bem como redução nos teores de Al e Mn trocáveis no solo, contribuindo para o desenvolvimento adequado das plantas (Caires *et al.*, 2004). A adoção do sistema plantio direto levou à aplicação superficial do calcário para a correção da acidez do solo, resultando em maior efeito corretivo nas camadas mais superficiais e resposta limitada em profundidade, sobretudo nos primeiros anos após a aplicação (Minato *et al.*, 2023). Desse modo, a acidez em camadas mais profundas pode comprometer a produtividade das culturas ao limitar o crescimento radicular e a absorção de água e nutrientes, indicando a necessidade de métodos complementares de correção (Borges *et al.*, 2022).

Como o gesso não libera íons OH^- e seus produtos solúveis não consomem íons H^+ , ele tem um efeito desprezível no pH do solo (Zoca e Penn, 2017). O gesso agrícola tem sido empregado no manejo de solos ácidos como fonte de Ca e S, e para a melhoria do ambiente radicular em profundidade, sem exercer função corretiva no pH do solo (Shruthi *et al.*, 2024). Sua alta solubilidade permite que esses nutrientes se movimentem pelo perfil do solo, alcançando as zonas de enraizamento de forma eficiente (Chen; Dick, 2011).

Além de ser um fornecedor de nutrientes, o gesso atua como condicionador do solo, melhorando sua estrutura física e química, aumentando a agregação de partículas, bem como a infiltração e o movimento da água no perfil (Chen; Dick, 2011). Ele ainda contribui na recuperação de solos sódicos, na mitigação da toxicidade por Al e na redução das perdas de fósforo solúvel (P) em áreas agrícolas (Souza *et al.*, 2025).

O gesso é proveniente tanto de depósitos naturais quanto de resíduos da indústria de fertilizantes fosfatados, apresentando, independentemente da origem, teores médios de

aproximadamente 20% de Ca, 15–18% de S e até 0,8% de P (Pias *et al.*, 2020). No contexto brasileiro, o gesso agrícola é predominantemente proveniente da indústria de fertilizantes fosfatados, sendo gerado na reação entre a rocha fosfática e o ácido sulfúrico (Souza *et al.*, 2025). Desse modo, sua aplicação na agricultura configura-se não apenas como uma solução técnica, mas também como uma estratégia ambientalmente adequada ao promover a reutilização do fosfogesso e contribuir para a redução dos impactos associados ao seu acúmulo e descarte em larga escala (Matveeva; Smirnov; Suchkov, 2022).

2.5 POLIHALITA

A polihalita é um mineral de sulfato de K, Ca e Mg de ocorrência natural, com fórmula química $K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$. Trata-se de um evaporito formado a partir de sucessivos eventos de evaporação marinha ao longo da história geológica (Kemp *et al.*, 2016).

Na década de 1930, os EUA demonstraram grande interesse na polihalita devido à sua abundância no oeste do Texas e no Novo México. Entretanto, com a descoberta de KCl em grandes quantidades em Saskatchewan, Canadá, o interesse pela polihalita diminuiu, à medida que a indústria se voltou para esta área de mineração (Barbier *et al.*, 2017). Com a recente identificação e exploração de mais de 2,5 bilhões de toneladas de polihalita no Reino Unido, o maior depósito de polihalita conhecido no mundo, o atual cenário de uso quase exclusivo de KCl na agricultura brasileira poderá ser alterado em um futuro breve (Kemp *et al.*, 2016).

Como fertilizante composto por quatro nutrientes essenciais para as plantas (K, Ca, Mg e S), a polihalita oferece uma nova solução para a nutrição das culturas (Vale; Sério, 2017). O K é um dos principais componentes da nutrição mineral das plantas, atuando, juntamente com o N e o P, na sustentação do crescimento e do desenvolvimento vegetal (Ushakova *et al.*, 2023). O K^+ participa de processos fisiológicos estratégicos, como a regulação osmótica, o controle estomático e a eficiência fotossintética, influenciando diretamente o uso da água pelas plantas (Sardans; Peñuelas, 2021). No cenário mundial, o KCl é o principal minério responsável pela maior parte do K utilizado na agricultura e representa até 96% da produção mundial de K (Prakash; Verma, 2016).

Nos últimos anos, o elevado grau de dependência externa do KCl aliado às constantes oscilações de seu preço tem servido de incentivo pela busca por fertilizantes potássicos alternativos. A polihalita tem se destacado como uma estratégia relevante para reduzir riscos à sustentabilidade da atividade agrícola (Oliveira *et al.*, 2026). Apesar de o KCl fornecer K de forma rápida para as culturas, as quantidades substanciais de cloreto adicionadas ao sistema

podem desenvolver problemas de salinidade. A substituição do KCl por fertilizantes potássicos isentos de cloro (Cl) pode ser uma alternativa viável para o manejo nutricional de algumas culturas (Vale; Sério, 2017).

Na composição da polihalita, o Ca e o Mg desempenham funções estruturais e metabólicas essenciais no crescimento vegetal. Na agricultura, o suprimento de Ca e Mg ocorre principalmente via aplicação de calcário, sendo rara a ocorrência de deficiências quando esse manejo é realizado adequadamente (Dal Molin *et al.*, 2020). O Mg se destaca por atuar na atividade fotossintética e no metabolismo energético das plantas, sendo componente estrutural da clorofila e ativador enzimático (de Sousa Ferreira *et al.*, 2023). O Ca contribui para a estabilidade das paredes celulares, integridade das membranas e regulação de processos fisiológicos ligados ao crescimento e às respostas ao estresse (Taiz *et al.*, 2021; Jing *et al.*, 2024). O S, por sua vez, é indispensável à síntese de aminoácidos, proteínas e enzimas, além de participar da nodulação e da fixação biológica de N₂ em leguminosas (Embrapa, 2007). As fontes de S mais comuns incluem o S elementar e o fosfogesso (Dal Molin *et al.*, 2020).

O fornecimento simultâneo de K, Ca, Mg e S por meio do uso de polihalita representa uma alternativa nutricional estratégica, especialmente em sistemas agrícolas que buscam maior eficiência no uso de nutrientes e equilíbrio nutricional das culturas (Yermiyahu *et al.*, 2017). Além dessa vantagem multinutriente, Yermiyahu *et al.* (2019) observaram que a dissolução da polihalita ocorre de forma mais lenta e demanda maior volume de água em comparação a fertilizantes altamente solúveis. Essa característica confere potencial de liberação gradual, favorecendo a disponibilidade residual de nutrientes para as culturas subsequentes (Oliveira *et al.*, 2025).

2.6 MATÉRIA ORGÂNICA

A matéria orgânica do solo consiste em um conjunto heterogêneo de compostos orgânicos os quais se encontram em diferentes graus de decomposição (Celestina *et al.*, 2019). Sua formação ocorre, em grande parte, a partir de insumos vegetais, como serapilheira e exsudatos radiculares, que são transformados pela ação dos organismos do solo, originando frações orgânicas que ingressam no solo tanto na forma particulada quanto dissolvida (Cotrufo *et al.*, 2015; Hoffland *et al.*, 2020). Estima-se que a matéria orgânica seja composta majoritariamente por C, representando cerca de 58% de sua constituição (Pribyl *et al.*, 2010).

O processo de decomposição da serapilheira ocorre pela ação integrada de fatores físicos, químicos e biológicos, dentre os quais a atividade microbiana desempenha papel

fundamental (Zheng *et al.*, 2018). Além disso, compostos derivados de microrganismos constituem grande parte da matéria orgânica associada a minerais (Cates *et al.*, 2019). A maioria dos microrganismos do solo é heterotrófica e depende da matéria orgânica como fonte de energia e nutrientes, sendo bactérias e fungos os principais agentes responsáveis pela decomposição desse material (Condrón *et al.*, 2010). Por meio do processo de mineralização e humificação da lignina, celulose e outros compostos, o material morto é transformado em compostos mais simples, incluindo dióxido de carbono (CO₂) e íons inorgânicos como amônio (NH₄⁺), Ca²⁺ e K⁺ (Robertson; Paul, 2000; Błońska *et al.*, 2021).

A matéria orgânica do solo desempenha papel central no sequestro de C, uma vez que o C proveniente de resíduos vegetais e da biomassa microbiana, após a morte dos organismos, é submetido à decomposição no solo (Almendros; González-Pérez, 2025). O estoque de C no solo é determinado pelo equilíbrio dinâmico entre a incorporação desse elemento via produtividade vegetal e sua liberação por meio da decomposição da matéria orgânica (Zhou *et al.*, 2022). A base desse estoque está associada à estabilização da fração orgânica, processo influenciado por reações biogeoquímicas entre compostos orgânicos, minerais e microrganismos (Li *et al.*, 2023). Essa estabilização pode ocorrer por mecanismos bióticos, vinculados à atuação de plantas, fauna e microrganismos, bem como por mecanismos abióticos, relacionados à proteção espacial e às interações organominerais (Dignac, 2017).

No processo biótico, os microrganismos do solo utilizam duas principais fontes de C como fonte de energia, sendo elas resíduos orgânicos frescos de origem vegetal e animal ou parte da fração orgânica já estabilizada no solo. Os resíduos frescos são mais facilmente degradáveis, pois contêm compostos poliméricos que podem ser rapidamente fragmentados e assimilados (Brookes *et al.*, 2008). Ao longo do tempo, a atividade microbiana transforma esses resíduos em matéria orgânica do solo humificada, caracterizada por um conjunto de pequenas moléculas orgânicas que se associam por interações fracas, o que garante maior complexidade química a esse material (Lützow *et al.*, 2006; Piccolo; Drosos, 2025).

Um ponto relevante nesse processo é a eficiência de utilização do C microbiano (CUE), que corresponde à fração do C assimilado incorporada à biomassa (Tao *et al.*, 2023). Valores elevados de CUE indicam maior incorporação de C ao crescimento microbiano e menor perda por respiração na forma de CO₂ (Wang *et al.*, 2021). Dessa forma, a CUE exerce papel fundamental na regulação da quantidade de C que permanece no solo, podendo influenciar significativamente seus estoques (Hagerty; Allison; Schimel, 2018).

Do ponto de vista abiótico, a estabilização da matéria orgânica do solo está associada, sobretudo, à sua interação com minerais da fração argila e oxihidróxidos de Fe e Al no solo

(Carvalho *et al.*, 2023). Essas associações organominerais podem ocorrer de diversas formas e reduzem a acessibilidade microbiana e a taxa de mineralização, aumentando o tempo de permanência do C no solo (Li *et al.*, 2023).

A matéria orgânica do solo é fundamental para o funcionamento do sistema edáfico, contribuindo para a ciclagem de nutrientes, estruturação, retenção de água e atenuação de contaminantes (Hussain *et al.*, 2023). Sistemas agrícolas sem aporte de insumos orgânicos podem intensificar a degradação do solo, com redução do C orgânico e da disponibilidade de nutrientes (Khan; Aleinikovienė; Butkevičienė, 2024). Em contrapartida, o sistema plantio direto em solos tropicais e subtropicais favorece a manutenção e o acúmulo de material orgânico, promovendo incrementos na capacidade de troca catiônica, especialmente em solos com predominância de argilas de baixa atividade (Ciotta *et al.*, 2003). Além disso, essa fração atua como reservatório de nutrientes, liberando-os gradualmente às plantas, sobretudo por meio de seus compartimentos mais estáveis (Mohammadi *et al.*, 2011).

2.7 ENZIMAS DO SOLO

Sabe-se que as reações bioquímicas são catalisadas por enzimas, proteínas com propriedades catalíticas que aceleram as reações químicas e estão diretamente relacionadas à ciclagem de nutrientes no solo (Zuccarini *et al.*, 2023). A especificidade enzimática é determinada, em grande parte, pela natureza dos grupos envolvidos nas ligações suscetíveis (Tabatabai, 1994).

As enzimas do solo são provenientes principalmente dos exsudatos radiculares, da decomposição da serapilheira e da atividade dos microrganismos. Elas desempenham papel fundamental em processos bioquímicos e nos ciclos de nutrientes, funcionando como indicadores sensíveis de mudanças biológicas no ambiente edáfico (Xu *et al.*, 2021). As enzimas do solo podem estar localizadas no interior das células microbianas, associadas à membrana plasmática ou ao espaço periplásmico, ou ainda fora das células, organizadas em complexos extracelulares (celulossomas), dissolvidas na solução do solo ou estabilizadas por interações com a matéria orgânica e minerais de argila (Fanin *et al.*, 2022).

As arilsulfatases são enzimas envolvidas no ciclo do S e foram as primeiras sulfatases identificadas na natureza. Essas enzimas catalisam a hidrólise de ésteres de sulfato associados a radicais aromáticos, como os ésteres fenólicos do ácido sulfúrico, liberando ânions sulfato essenciais para o desenvolvimento de plantas e microrganismos (Tabatabai; Bremner, 1970; Carneiro *et al.*, 2024). A atividade das arilsulfatases varia conforme as características do solo,

sendo geralmente menor em ambientes com baixos teores de matéria orgânica. Essa atividade enzimática reflete condições específicas de cada solo, podendo ser modulada pelo estágio de transformação da matéria orgânica e pela vegetação responsável por sua formação (Nogueira; Melo, 2003)

A β -glicosidase, por sua vez, é uma enzima extracelular associada à degradação da matéria orgânica do solo, atuando na etapa final da decomposição da celulose por meio da hidrólise da celobiose em glicose, a qual constitui uma importante fonte de energia para os microrganismos do solo (de Almeida; Naves; da Mota, 2015; Carneiro *et al.*, 2024). A β -glicosidase é amplamente utilizada como indicador da qualidade do solo e trata-se de uma das enzimas mais abundantes e facilmente detectáveis envolvidas na decomposição da celulose, o que a torna adequada para avaliar a influência de fatores físico-químicos sobre a matéria orgânica do solo (Turner *et al.*, 2002; da Silva; Kaschuk, 2025).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Estimar o aporte de C e de nutrientes (Ca, Mg, K e S) no solo com o uso de polihalita em sistema plantio direto.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o aporte de C pela biomassa das culturas considerando o uso de gesso agrícola e polihalita;
- Quantificar os estoques de C orgânico total, C orgânico extraído em água quente e C orgânico oxidável em permanganato no solo influenciados pelo uso de gesso agrícola e polihalita;
- Estimar as atividades das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase após o emprego de gesso agrícola e polihalita;
- Determinar os estoques de nutrientes (Ca, Mg, K e S) no solo após o emprego de gesso agrícola e polihalita.

4 HIPÓTESES

O uso de polihalita apresenta potencial para promover aporte de C e influenciar a atividade de enzimas associadas aos ciclos do carbono e do enxofre em sistema plantio direto. Além disso, a utilização de polihalita promove incrementos na produtividade de grãos e no estoque de nutrientes no solo.

5 MATERIAL E MÉTODOS

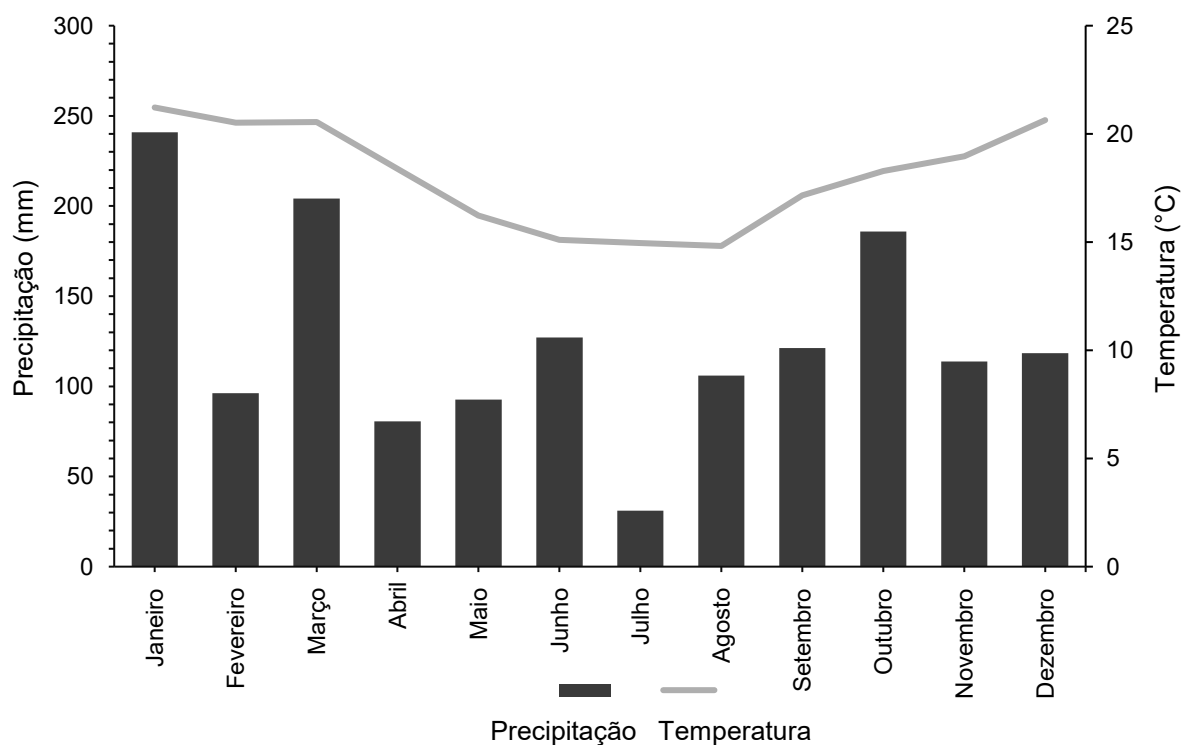
5.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado na Fazenda Escola “Capão da Onça” (FESCON) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) (25°05'58" de latitude Sul e 50°02'36" de longitude Oeste, com 1027 m de altitude), localizada no município de Ponta Grossa-PR.

O solo na área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho textura média (Santos *et al.*, 2018), conduzido em sistema plantio direto de longa duração. A caracterização climática da localidade é definida como Cfb (mesotérmico, úmido, subtropical), apresentando verões frescos e geadas frequentes no inverno, sem estação seca definida (Peel; Finlayson; McMahon, 2007).

Os dados médios mensais de cinco anos de precipitação pluvial durante a avaliação do experimento estão apresentados na Figura 1.

Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura do ar média mensal durante o período de cinco anos de execução do experimento. Safras de 2018 a 2022, Ponta Grossa - PR.



Fonte: Dados mensais de precipitação pluvial obtidos na estação meteorológica da BASF, localizada na Fazenda Capão da Onça. Dados históricos de precipitação pluvial média (2018 a 2022).

O experimento foi conduzido no sistema de rotação de culturas, sendo constituída de dois ciclos da sucessão trigo-soja-aveia preta-milho, sendo a aveia preta cultivada como planta de cobertura do solo, sem adubação.

5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental empregado foi em blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições. O tamanho das parcelas foi de 8 m × 6 m (48 m²). Os tratamentos foram: (I) controle; (II) aplicação de gesso agrícola; (III) aplicação de polihalita granulada em cada cultura (trigo, soja e milho); e (IV) polihalita granulada em dose total antecipada para as culturas de trigo, soja e milho. A polihalita utilizada continha 14% de K₂O; 12,1% de Ca; 3,6% de Mg e 19% de S.

A aplicação de gesso agrícola foi realizada sobre a superfície do solo pouco antes da semeadura do trigo, em junho de 2018, sendo a dose (4,5 Mg ha⁻¹) definida por meio do método de Caires & Guimarães (2018). A aplicação de polihalita foi realizada à lanço sobre a superfície, pouco antes da semeadura das culturas de trigo (60 kg K₂O ha⁻¹), soja (120 kg K₂O ha⁻¹) e milho (120 kg K₂O ha⁻¹), totalizando 600 kg K₂O ha⁻¹ nos dois ciclos de trigo-soja-milho. Nos tratamentos controle e com aplicação gesso agrícola, as mesmas doses de K₂O, na forma de KCl, foram aplicadas à lanço sobre a superfície, pouco antes da semeadura das culturas de milho, trigo e soja, na mesma época da aplicação de polihalita. A polihalita em dose total antecipada foi aplicada antes da semeadura do trigo em 2018 e 2020, visando atender as necessidades das culturas de trigo-soja-milho (300 kg ha⁻¹ de K₂O em cada aplicação).

No primeiro ciclo da rotação de culturas, o trigo, cultivar Quartzo, foi semeado em 4 de julho de 2018, na densidade de 150 kg ha⁻¹ de sementes e espaçamento de 0,17 m entre as linhas. Na semeadura do trigo, foram aplicados 250 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico [MAP, 11-52-00 (N-P₂O₅-K₂O)] e, em cobertura, foram utilizados 120 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia. A adubação fosfatada foi realizada visando suprir as necessidades de P da sucessão trigo-soja. Na sequência, a soja, cultivar LG 60158 IPRO, foi semeada em 5 de dezembro de 2018, na densidade de 15 sementes m⁻², inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, e espaçamento de 0,45 m entre as linhas, sem aplicação de N e P. Posteriormente, o milho, híbrido AG 9025 PRO3, foi semeado em 19 de setembro de 2019, na densidade de 86.000 sementes ha⁻¹ e espaçamento de 0,45 m entre as linhas. A adubação do milho consistiu nas aplicações de 250 kg ha⁻¹ de MAP (11-52-00) na semeadura e 225 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na forma de ureia, no estágio V₅ (cinco folhas totalmente expandidas).

No segundo ciclo da rotação de culturas, o trigo, cultivar TBio Ponteiro, foi semeado em 6 de julho de 2020, na densidade de 150 kg ha⁻¹ de sementes e espaçamento de 0,17 m entre as linhas. A adubação do trigo consistiu nas aplicações de 235 kg ha⁻¹ de MAP (11-52-00) na semeadura e 117 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na forma de ureia. Assim como no primeiro ciclo, a adubação fosfatada foi realizada para suprir as necessidades de P da sucessão trigo-soja. Na sequência, a soja, cultivar RK 6316 IPRO, foi semeada em 26 de novembro de 2020, na densidade de 14 sementes m⁻¹, inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, e espaçamento de 0,45 m entre as linhas, sem aplicação de N e P. Por fim, o milho, híbrido K9606 VIP 3, foi semeado em 25 de outubro de 2021, na densidade de 4 sementes m⁻¹ e espaçamento de 0,45 m entre as linhas. A adubação do milho foi realizada com 250 kg ha⁻¹ de MAP (11-52-00) na semeadura e 225 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na forma de ureia, no estágio V₅ (cinco folhas totalmente expandidas).

5.3 AVALIAÇÕES

Dentre as avaliações, foram determinadas a produtividade acumulada dos grãos, o aporte de C pela biomassa das culturas e a atividade das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase, e quantificados os estoques de C orgânico total, C orgânico extraído em água quente, C orgânico oxidável em permanganato e de nutrientes (Ca, Mg, K e S) no perfil do solo (0–60 cm).

As produtividades de grãos de trigo, soja e milho, nos dois ciclos da rotação de culturas, foram avaliadas após a maturidade fisiológica de cada cultura, sendo a colheita realizada com máquina colhedora de parcelas apenas nas linhas centrais de cada parcela. Posteriormente, as produtividades obtidas em cada cultivo ao longo dos anos foram somadas, resultando na produtividade acumulada de grãos da rotação de culturas.

O aporte total de C pela biomassa das culturas (resíduos da parte aérea e de raízes) foi estimado a partir dos dados de produtividade de grãos de cada safra, de acordo com Sá *et al.* (2014). No caso da aveia preta, o aporte de C foi estimado pela avaliação da produção de biomassa da parte aérea em três linhas de 1 m de plantas (0,51 m²) por ocasião do florescimento da cultura.

Após a colheita do milho do segundo ciclo da rotação de culturas (trigo-soja-aveia preta-milho), amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. Foram retiradas 12 subamostras por parcela para constituir uma amostra composta das camadas de 0-10 e 10-20 cm por meio de trado calador, e cinco subamostras por parcela para constituir uma amostra composta das camadas de 20-40 e 40-60 cm por meio de trado holandês. Nessas

amostras, foram determinados os teores de C orgânico total por via úmida, C orgânico extraído em água quente, C orgânico oxidável em permanganato, Ca trocável, Mg trocável, K trocável e S-SO₄.

O teor de C orgânico total foi determinado por via úmida de acordo com a metodologia descrita por Pavan *et al.* (1992), o teor de C orgânico extraído em água quente (CAQ) foi determinado conforme o método descrito por Ghani; Dexter; Perrott (2003) e o teor de C oxidável em permanganato (CPER) foi determinado segundo a metodologia descrita por Inagaki *et al.* (2017). Os teores de Ca, Mg e K trocáveis no solo foram determinados de acordo com a metodologia de Pavan *et al.* (1992). A análise de S-SO₄ foi realizada por meio de extração com solução de fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹ e determinação por turbidimetria com sulfato de bário, conforme o método descrito por Cantarella & Prochnow (2001).

A densidade do solo foi determinada por meio da coleta de uma amostra indeformada de solo utilizando um anel de aço volumétrico de 5 × 5 cm (Blake; Hartge, 1986), nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm.

O cálculo dos estoques de C orgânico em cada compartimento e de nutrientes (Ca, Mg, K e S), para cada camada de solo, foi realizado por meio da seguinte equação:

Estoque de C ou nutriente (Mg ha⁻¹)

$$= \frac{\text{teor de C ou nutriente (g kg}^{-1}\text{)} \times \text{densidade do solo (Mg m}^{-3}\text{)} \times \text{espessura de solo (cm)}}{10}$$

As atividades das enzimas β-glicosidase (Eivazi; Tabatabai, 1988) e arilsulfatase (Tabatabai; Bremner, 1970) foram determinadas nas amostras coletadas da camada superficial do solo (0–10 cm).

5.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

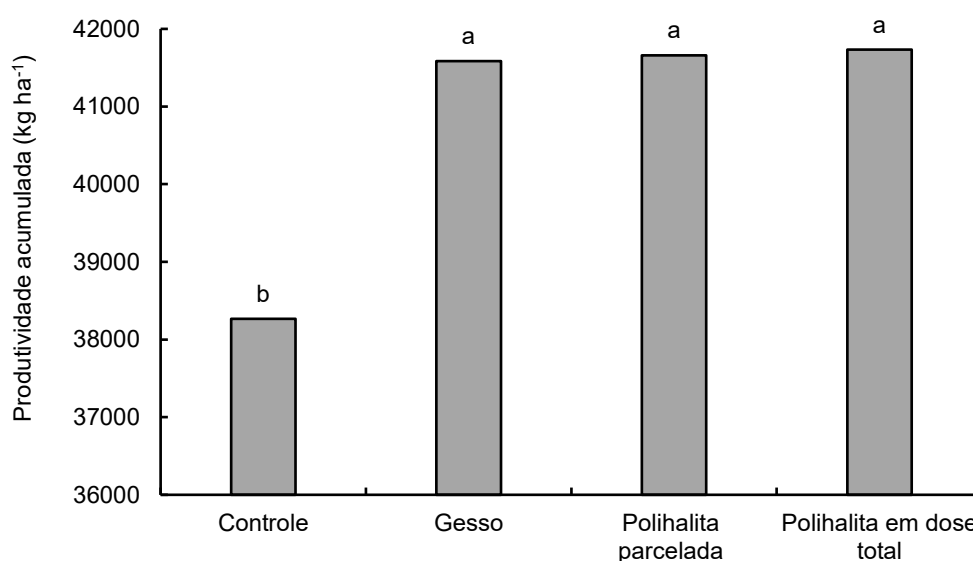
Os resultados foram submetidos à análise de variância e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste de LSD ao nível de 5%.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 PRODUTIVIDADE ACUMULADA DE GRÃOS

A produtividade acumulada de grãos foi significativamente maior com o uso de gesso e o emprego de polihalita, tanto em dose total antecipada para as três culturas, como em dose parcelada para cada uma das culturas, em relação ao controle (Figura 2). A produtividade acumulada de grãos no tratamento controle foi de 37401 kg ha⁻¹. Nos tratamentos com polihalita, a produtividade foi de 41660,93 kg ha⁻¹ para aplicação em dose parcelada e 41731,59 kg ha⁻¹ para aplicação em dose total, enquanto que a aplicação do gesso resultou em uma produtividade de 41586,63 kg ha⁻¹. Desse modo, os incrementos na produtividade acumulada de grãos com o uso de gesso ou polihalita, em dose total ou parcelada, em comparação ao controle, foram semelhantes e da ordem de 11%.

Figura 2. Produtividade acumulada de grãos das culturas de milho, trigo e soja em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR.



Fonte: O autor.

Nota: Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste t (LSD) a 5%.

Em um estudo de Pias *et al.* (2020) foi observado que a aplicação de gesso aumentou a produtividade de grãos em sistema de plantio direto. De acordo com Tiecher *et al.* (2018), o efeito da aplicação de gesso está principalmente associado à redução da atividade do Al³⁺ trocável nas camadas subsuperficiais do solo, atenuando sua toxicidade às plantas, além do incremento nos teores de Ca²⁺ nessas camadas. Esse conjunto de alterações químicas favorece

o crescimento radicular em profundidade, ampliando a exploração do perfil do solo e, conseqüentemente, a absorção de água e nutrientes, o que contribui para o aumento da produtividade de grãos das culturas.

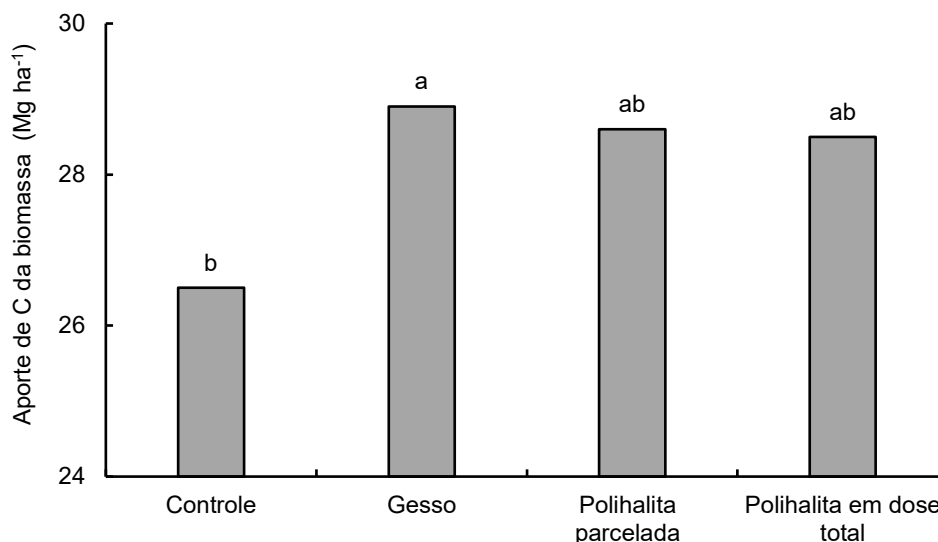
Já, com relação à polihalita, trata-se de uma fonte natural de nutrientes com menor solubilidade em relação ao KCl (Yermiyahu *et al.*, 2019). Dessa forma, a liberação de nutrientes ocorre de maneira gradual, porém eficiente o suficiente para suprir as exigências das culturas longo do seu ciclo. Por apresentar essa característica, a polihalita pode ter prolongado sua disponibilidade no solo por um período mais extenso.

Quando avaliado o tratamento controle (com KCl), observou-se produtividade acumulada de grãos inferior aos tratamentos com polihalita e gesso (com KCl), o que evidencia que o solo apresentava limitação nutricional. Isso indica que, assim como o gesso, a polihalita apresentou potencial para fornecer Ca e S às plantas, promovendo melhoria do ambiente radicular, maior exploração do solo em profundidade e melhor absorção de água e nutrientes.

6.2 APORTE DE CARBONO DA BIOMASSA DAS CULTURAS

O aumento na produtividade acumulada de grãos (Figura 2) resultou em incremento no aporte de C da biomassa das culturas (Figura 3). O uso de gesso agrícola apresentou aporte significativo de C da biomassa das culturas comparado ao controle, enquanto a polihalita, tanto aplicada em dose parcelada quanto em dose total, não diferiu estatisticamente da aplicação de gesso agrícola. O aporte de C da biomassa das culturas no tratamento controle foi de 26,5 Mg ha⁻¹ enquanto com gesso foi de 28,9 Mg ha⁻¹. Nos tratamentos com polihalita em dose total e parcelada, o aporte foi de 28,5 Mg ha⁻¹ e 28,6 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Figura 3. Aporte de C da biomassa dos resíduos das culturas em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR.



Fonte: O autor.

Nota: Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste t (LSD) a 5%. 7

Em estudos de Bernardi, Souza e Vale (2018), a polihalita apresentou elevada eficiência na promoção de maiores rendimentos de biomassa quando utilizada como fonte exclusiva de K. Desse modo, considerando que as aplicações de polihalita, tanto em dose total quanto parcelada, apresentaram valores intermediários de C da biomassa, com médias numericamente superiores ao controle, esses resultados sugerem potencial desse fertilizante para contribuir com o aumento de sequestro de C no sistema plantio direto, ainda que de forma indireta.

Esse comportamento pode estar relacionado à composição multielementar da polihalita, garantindo o fornecimento equilibrado de nutrientes, aumentando a eficiência fotossintética das plantas e os níveis de C aportados ao solo. Segundo Raza *et al.* (2025), grande parte da fixação de CO₂ atmosférico ocorre via fotossintética, e esse C é posteriormente incorporado ao solo pelos resíduos culturais, tanto da parte aérea como das raízes. Durante a decomposição, parte desse C é transformada em matéria orgânica do solo, elevando os estoques de matéria orgânica do solo.

Estudos de Sitko *et al.* (2019) indicaram que as deficiências de Ca, Mg e K reduziram a eficiência fotossintética do milho, evidenciando a importância desses nutrientes para o crescimento vegetal. Além disso, conforme Kopriva *et al.* (2002) e Zhao, Hawkesford e McGrath (1999), o N e o S estão metabolicamente interligados na síntese de aminoácidos, como cisteína e metionina, de modo que níveis adequados de S otimizam a incorporação do N nas proteínas. Dessa forma, a aplicação de polihalita, ao fornecer uma combinação equilibrada

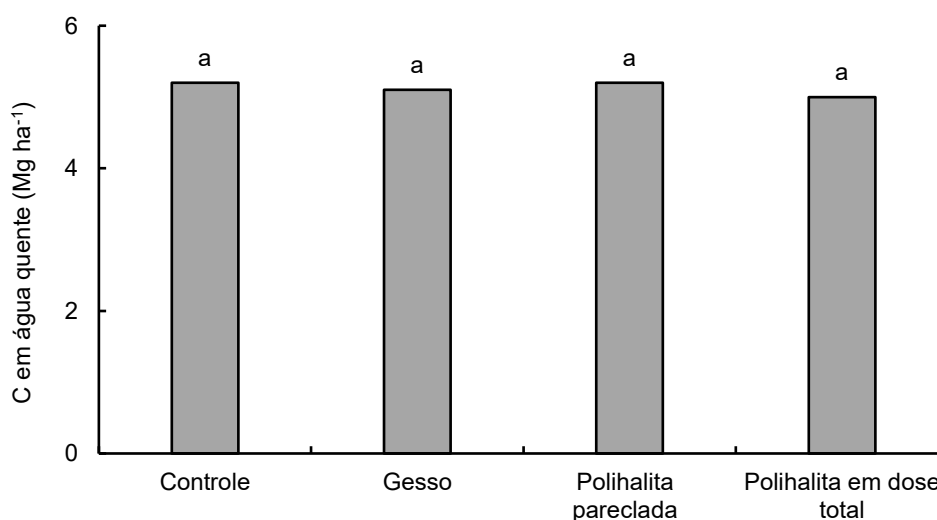
desses macronutrientes, favorece tanto o metabolismo proteico quanto a fotossíntese, contribuindo para o aumento de biomassa vegetal.

A polihalita promoveu aumento de C da biomassa das culturas semelhante ao efeito obtido com o uso de gesso. No estudo de Clemente *et al.* (2017) foi verificado que a aplicação de gesso proporcionou maior desenvolvimento de raízes nas camadas subsuperficiais, visto que o gesso agrícola é amplamente reconhecido por fornecer condições ideais para o crescimento, permitindo que as plantas possam explorar um volume maior de solo. Desse modo, o maior crescimento radicular em profundidade aumenta a biomassa radicular total e a deposição de C no solo. Os resultados obtidos no presente estudo mostraram que efeitos semelhantes ao gesso no aporte de C podem ser obtidos com o uso de polihalita.

6.3 ESTOQUE DE CARBONO EXTRAÍDO EM ÁGUA QUENTE

O estoque de C extraído em água quente não foi alterado significativamente pelos tratamentos (Figura 4). O estoque médio de C extraído em água quente durante o período de duração do experimento foi de 5,12 Mg ha⁻¹.

Figura 4. Estoque de C extraído por água quente no perfil do solo (0–60 cm) em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR.



Fonte: O autor.

Nota: Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste t (LSD) a 5%.

De acordo com Curtin; Beare e Qiu (2022), a ausência de diferenças estatísticas no teor de C extraível em água quente entre os tratamentos pode estar relacionada à natureza desse método de extração, o qual é considerado suave e recupera apenas uma pequena proporção do

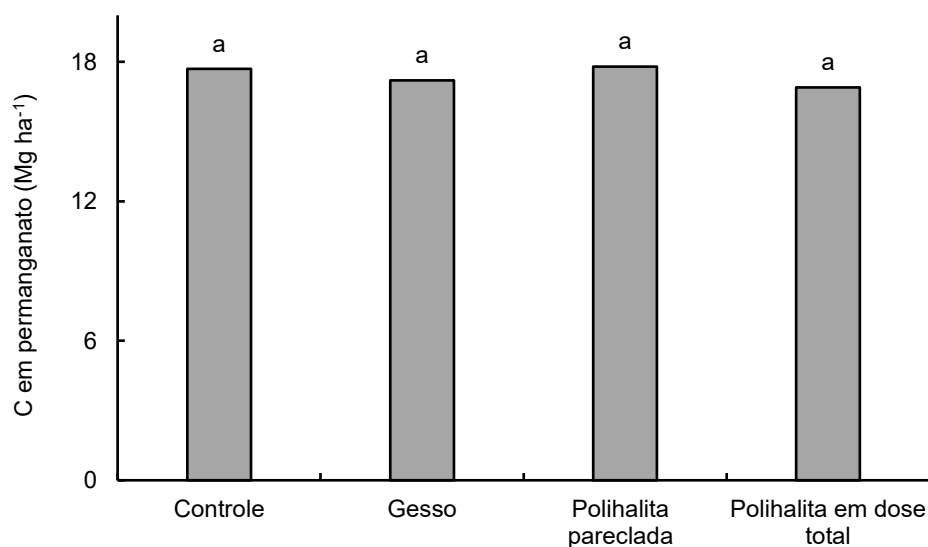
C lábil total do solo. Além disso, a contribuição das diferentes frações físicas da matéria orgânica do solo ainda não é completamente compreendida, e evidências indicam que frações fisicamente lábeis, apresentam baixa extratibilidade em água quente.

Embora o C extraível em água quente seja considerado um dos indicadores mais sensíveis da matéria orgânica lábil do solo, estudos de Ghani; Dexter e Perrott (2003) demonstraram que sua maior capacidade discriminatória ocorre em situações de mudanças contrastantes no uso da terra e na intensidade de manejo, como a conversão de solos nativos para sistemas agrícolas ou alterações no regime de pastejo. Em sistemas onde o tipo de uso do solo e o manejo são mantidos constantes, como no presente estudo, variações relacionadas apenas à fonte ou à forma de aplicação de fertilizantes podem não ser suficientes para promover alterações detectáveis nos teores de C extraível em água quente. Dessa forma, a ausência de diferença significativa entre os tratamentos pode indicar que as práticas avaliadas não alteraram substancialmente a dinâmica da fração lábil do C extraível em água quente.

6.4 ESTOQUE DE CARBONO OXIDÁVEL EM PERMANGANATO

O estoque de C oxidável em permanganato não foi alterado significativamente pelos tratamentos (Figura 5). O estoque médio de C oxidável em permanganato durante o período de duração do experimento foi de 17,4 Mg ha⁻¹.

Figura 5. Estoque de C oxidável em permanganato no perfil do solo (0–60 cm) em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR.



Fonte: O autor.

Nota: Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste t (LSD) a 5%.

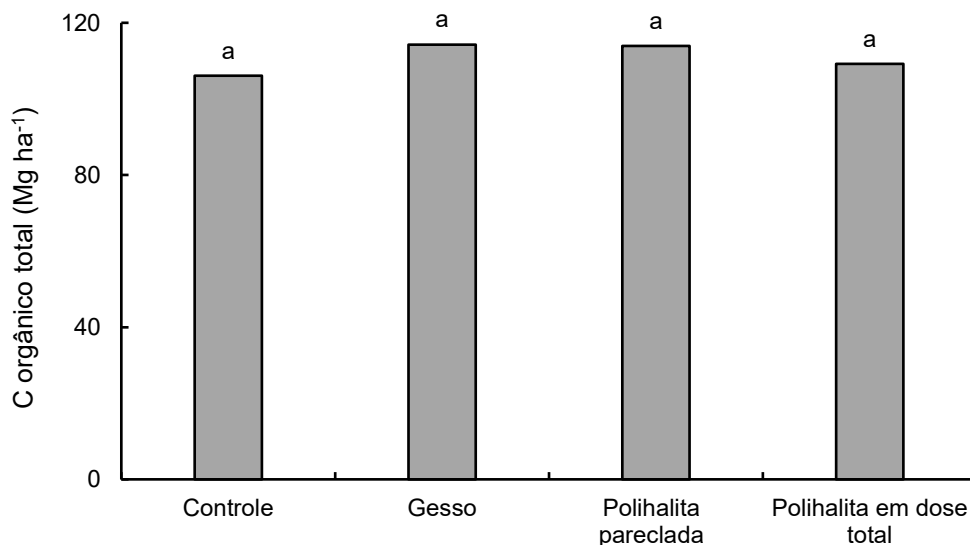
A ausência de diferença significativa no estoque de C oxidável por permanganato entre os tratamentos pode estar associada à seletividade do método em relação aos diferentes compostos orgânicos presentes no solo. Estudos de Tirol-padre e Ladha (2004) demonstraram que açúcares, aminoácidos e diversos ácidos orgânicos, embora considerados frações lábeis da matéria orgânica do solo, apresentam baixa reatividade ao KMnO_4 , com apenas 2 a 45% do C sendo oxidado após 1 h de reação. Dessa forma, eventuais incrementos de C provenientes do aumento da biomassa vegetal e da atividade radicular, induzidos pela aplicação de polihalita ou gesso, podem não ter sido plenamente captados pelo método de C em permanganato, resultando na ausência de diferença estatística entre os tratamentos.

Além disso, de acordo Bongiorno *et al.* (2019), os compartimentos de C lábil, formados principalmente a partir de resíduos vegetais recentes, exsudatos radiculares e biomassa microbiana, apresentam maior sensibilidade às mudanças no manejo do solo. A resposta dessas frações também se apresenta dependente da intensidade e da duração das alterações promovidas no sistema. Portanto, a ausência de diferenças significativas nas frações lábeis de C entre os tratamentos avaliados indica que o estudo em curto prazo pode não ter sido suficiente para promover mudanças detectáveis na dinâmica da matéria orgânica do solo.

6.5 ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO TOTAL

O estoque de C orgânico total no perfil do solo (0–60 cm) não foi alterado significativamente pelos tratamentos (Figura 6). O aporte médio de C orgânico total durante o período de duração do experimento do experimento foi de $110,87 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Figura 6. Aporte de C orgânico total no perfil do solo (0–60 cm) em função das aplicações de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR.

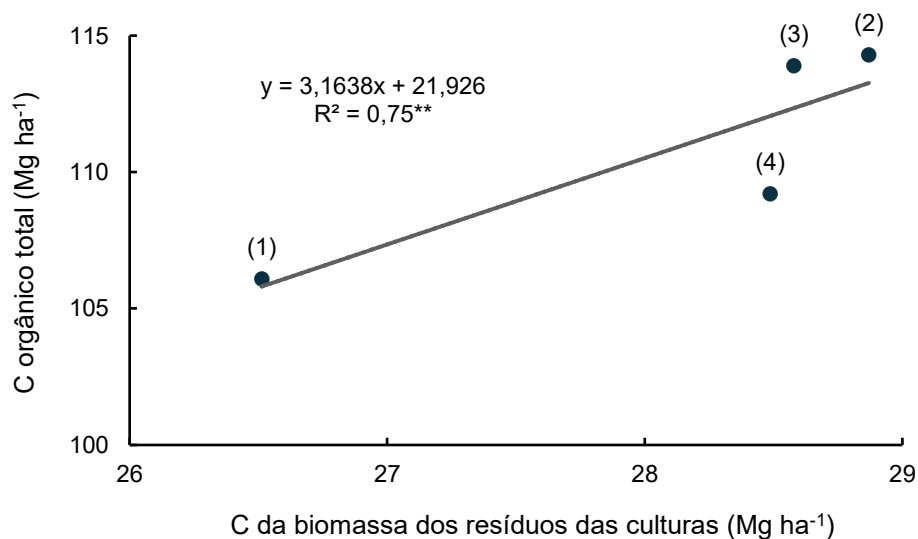


Fonte: O autor.

Nota: Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste t (LSD) a 5%.

Apesar de os estoques de C orgânico total e das formas lábeis de C (C extraído em água quente e C oxidável em permanganato) não terem sido influenciados pelos tratamentos, houve estreita relação entre o aporte de C da biomassa dos resíduos das culturas e o C orgânico total no perfil do solo (0–60 cm), mostrando que o incremento de C da biomassa das culturas levou a um aumento no estoque de C orgânico total no solo (Figura 7).

Figura 7. Relação entre o aporte de C da biomassa dos resíduos das culturas e o estoque de C orgânico total no perfil do solo (0–60 cm) em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR.



Fonte: A autor.

Nota: (1) controle, (2) gesso agrícola, (3) polihalita parcelada e (4) polihalita em dose total antecipada.

** : $P < 0,01$.

Em estudos de Inagaki *et al.* (2016) também não foram observados efeitos significativos no aporte C orgânico total do solo com o uso do gesso, entretanto houve correlação entre o C da biomassa das culturas e o C orgânico total. Segundo os autores, essa correlação positiva foi atribuída à melhoria na fertilidade do solo que favoreceu o desenvolvimento das culturas e das raízes, contribuindo para uma maior entrada de C da biomassa proveniente de resíduos de culturas na superfície do solo e da biomassa radicular subterrânea. Essas maiores entradas de C da biomassa, juntamente com a ausência de perturbação do solo, resultam em taxas elevadas de acúmulo e sequestro de C orgânico no solo.

A correlação observada entre o aporte de C da biomassa dos resíduos das culturas e o C orgânico total no perfil do solo (0–60 cm) é reforçada pelo fato de que de resíduos vegetais constituem importante fonte de carbono para a fração orgânica do solo. Dessa forma, maiores entradas de biomassa favorecem o acúmulo de C orgânico total ao longo do tempo (Nelson e Sommers, 1982).

Resultados obtidos por Loss *et al.* (2012) também indicam que o maior acúmulo de resíduos vegetais está diretamente associado ao aumento dos estoques de C orgânico total no solo. Por este motivo, a correlação positiva entre os aportes de C da biomassa das culturas e de C orgânico total indica que o uso de polihalita pode ser visto como uma forma de melhorar o aporte de C em agricultura de conservação baseada no sistema plantio direto.

6.6 ATIVIDADE ENZIMÁTICA

A atividade da enzima β -glicosidase foi maior com o uso de gesso agrícola, enquanto a atividade da enzima arilsulfatase não foi influenciada pelos tratamentos (Tabela 1). O uso de gesso, além de ocasionar maior atividade da enzima β -glicosidase, também proporcionou maior aporte de C dos resíduos de biomassa das culturas em relação ao controle.

Tabela 1. Atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase na camada superficial do solo (0–10 cm) em função dos tratamentos com gesso e aplicação de polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR.

Tratamento	β -glicosidase	Arilsulfatase
	----- $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ -----	
Controle	186,5ab	237,2
Gesso	196,0a	231,9
Polihalita parcelada	179,7b	220,3
Polihalita em dose total	184,2b	223,3
Efeito	*	ns

Fonte: O autor.

Nota: ns: não-significativo e *: $P < 0,05$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste t (LSD) a 5%.

A β -glicosidase atua na etapa final da degradação da celulose, catalisando a hidrólise da celobiose em glicose, constituindo importante indicador da dinâmica do C e da qualidade biológica do solo (Tabatabai, 1994). Assim, alterações em sua atividade refletem mudanças na decomposição da matéria orgânica e na demanda microbiana por C. No presente estudo, embora a polihalita tenha promovido incremento no aporte de C da biomassa das culturas, tal efeito não se refletiu em maior atividade de β -glicosidase, sugerindo possível alteração na alocação metabólica microbiana ou na estrutura da comunidade, com menor investimento na produção de enzimas relacionadas à degradação da celulose. Desse modo, assim como no estudo de Liu *et al.* (2020), o qual sustenta a ideia de que a atividade enzimática é moldada pela disponibilidade relativa de recursos, o comportamento dos tratamentos com polihalita pode estar associado à maior disponibilidade de nutrientes minerais reduzindo o investimento microbiano na produção de enzimas associadas à aquisição de C.

Embora não tenham sido observadas diferenças significativas na atividade da arilsulfatase entre os tratamentos, houve clara tendência numérica de menor atividade desta enzima com o emprego de polihalita, certamente pela maior disponibilidade de S mineral no solo. A arilsulfatase age catalisando a hidrólise de ésteres de sulfato orgânico e liberando sulfato (SO_4^{2-}), que é a forma inorgânica assimilável pelas plantas (Tabatabai; Bremner, 1970).

Estudos de Kunito *et al.* (2022) demonstraram que quando o solo apresenta baixos teores de sulfato disponível, os microrganismos tendem a intensificar a produção de arilsulfatase para mineralizar o S orgânico e suprir essa deficiência. Por outro lado, quando há maior disponibilidade de S mineral, diminui a necessidade de mineralização do S orgânico. Como consequência, há redução na síntese e na atividade da arilsulfatase.

6.7 ESTOQUES DE NUTRIENTES DO SOLO

Quando avaliados os estoques de nutrientes no solo após as aplicações de polihalita e gesso agrícola, a análise de variância revelou influência significativa apenas no estoque de S no solo (Tabela 2). No entanto, houve clara tendência de maior acúmulo de Ca no solo com as aplicações de gesso e polihalita, e de Mg com o uso de polihalita. O estoque de K no solo não foi alterado pelos tratamentos envolvendo o emprego de KCl ou de polihalita.

Tabela 2. Estoques de nutrientes do perfil do solo (0-60 cm), em função da aplicação de gesso e polihalita em sistema plantio direto. Ponta Grossa-PR.

Tratamento	K	Ca	Mg	S
	Kg ha ⁻¹			
Controle	647	2427	494	149c
Gesso	638	2690	483	336b
Polihalita parcelada	610	2705	586	511a
Polihalita em dose total	547	2574	572	436ab
Efeito	ns	ns	ns	**

Fonte: o autor.

Nota: ns: não-significativo e **: $P < 0,01$. Letras iguais nas colunas não diferem significativamente pelo teste t (LSD) a 5%.

O estoque de S no solo foi significativamente maior com a aplicação de polihalita em dose parcelada, seguido pela aplicação de polihalita em dose total e, depois, pela aplicação de gesso, em relação ao tratamento controle (Tabela 2). Destaca-se que a polihalita possui maior concentração de S na sua composição (19%) em comparação com o gesso agrícola (14%). Isso explica porque houve maior estoque de S no solo com o emprego de polihalita em relação ao gesso agrícola. Como o sulfato apresenta alta mobilidade no perfil do solo, a aplicação de polihalita em dose total para as culturas de trigo, soja e milho proporcionou menor estoque de S no solo em comparação à aplicação de polihalita parcelada em cada cultura, certamente por ter favorecido a movimentação mais rápida de sulfato para camadas inferiores a 60 cm.

O S desempenha funções essenciais no desenvolvimento das plantas e na qualidade das colheitas, participando da formação de aminoácidos sulfurados e proteínas, além de atuar na regulação metabólica, na fotossíntese e nos mecanismos de defesa contra patógenos (Vitti; Otto; Savieto, 2015). Assim, os incrementos significativos no estoque de S no solo promovidos pela aplicação de polihalita, principalmente de forma parcelada em cada cultura, evidenciam sua eficiência como fonte do nutriente, podendo contribuir para a melhoria do metabolismo vegetal e da qualidade das colheitas.

7 CONCLUSÕES

O uso de polihalita granulada, aplicada tanto em dose total antecipada para as culturas de trigo, soja e milho, quanto de forma parcelada em cada cultura, promoveu aumento na produtividade acumulada de grãos em sistema plantio direto, apresentando desempenho semelhante ao gesso agrícola. Esses resultados indicam que a polihalita se constitui em alternativa viável como fonte multinutrientes, contribuindo para o suprimento de K, Ca, Mg e S e para a melhoria do desempenho produtivo das culturas.

O incremento na produtividade acumulada de grãos se refletiu em maior aporte de C da biomassa das culturas, evidenciando o potencial indireto da polihalita em favorecer a entrada de C no sistema solo-planta. No entanto, os efeitos desse maior aporte de biomassa não se refletiram em mudanças detectáveis nos estoques de C orgânico do solo e em suas frações lábeis (C extraível em água quente e C oxidável em permanganato) no período avaliado, sugerindo que a consolidação desses efeitos pode ocorrer apenas em escalas temporais mais longas.

A polihalita proporcionou maior estoque de S no perfil do solo (0–60 cm) em relação ao gesso agrícola, especialmente quando aplicada de forma parcelada em cada cultura.

De modo geral, a polihalita demonstrou potencial agrônômico semelhante ao gesso agrícola no aumento da produtividade de grãos e no aporte de C via biomassa das culturas, configurando-se como alternativa estratégica para uso em sistema plantio direto. Entretanto, seus efeitos sobre os estoques de C e indicadores biológicos do solo demandam avaliações em um prazo maior que o verificado no estudo.

REFERÊNCIAS

- ABREU JR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 2, p. 337-343, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000200019>.
- ADAK E.; SENGUPTA S. Role of polyhalite in soil-plant nutrition studies. **International Journal of Agriculture and Nutrition**, v. 6 (2), p. 32-34 2024. DOI: <https://doi.org/10.33545/26646064.2024.v6.i2a.179>.
- AL-MUSAWI, Z. K.; VONA, V. K.; ISTVÁN M. Utilizing Different Crop Rotation Systems for Agricultural and Environmental Sustainability: A Review. **Agronomy**, v. 15, n. 8, 1966, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081966>.
- ALMENDROS, G.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A. Soil organic carbon sequestration mechanisms and the chemical nature of soil organic matter - review. **Sustainability**, v. 17, n. 15, 6689, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17156689>.
- AMADO, T. J. C.; SANTI, A.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. II- Influência na decomposição de resíduos, liberação de nitrogênio e rendimento de milho sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 27, p. 1085-1096, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600013>.
- ATEYE, M. D. *et al.* Comparative analysis of nutritional composition: proximate and mineral content of soybean varieties. **Discover Food**, v. 5, n. 1, 302, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00626-w>.
- BALET, T.; YADETE, E. Effect of Mono Cropping on Soil Health and Fertility Management for Sustainable Agriculture Practices: A Review. **Journal of Plant Sciences**, v. 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.jps.20231106.13>.
- BARBIER, M. *et al.* Characterizing polyhalite plant nutritional properties. **Agricultural Research and Technology**, v. 6, n. 3, 2017. DOI: <https://doi.org/10.57647/ijrowa-2zzr-s758>.
- BARBOSA, M. C. *et al.* The Effects of Potassium Dose, Timing, and Source in Soybean Crops in Brazilian Savannah Oxisol. **Sustainability**, v. 17, n. 3, 934, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17030934>.
- BERNARDES, T. F.; RÊGO, A. C. Study on the practices of silage production and utilization on Brazilian dairy farms. **Journal of Dairy Science**, v. 97, p. 1852–1861, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7181>.
- BERNARDI, A. C. C.; SOUZA, G. B; VALE, F. Polyhalite compared to KCl and gypsum in alfalfa fertilization. [S.l.: s.n.], 2018. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31860.24967>.
- BESSEN, M. R. *et al.* Cover cropping associated with no-tillage system promotes soil carbon sequestration and increases crop yield in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 242, 106162, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106162>.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America, p. 363–375, 1986. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>.

BŁOŃSKA, E. *et al.* Enzymatic activity of soils and soil organic matter stabilization as an effect of components released from the decomposition of litter. **Applied Soil Ecology**, v. 157, 103723, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103723>.

BOCZKOWSKA, M.; PODYMA, W.; ŁAPIŃSKI, B. Oat. In: **Genetic and Genomic Resources for Grain Cereals Improvement**. Academic Press, 2016. p. 159-225. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802000-5.00004-6>.

BONGIORNO, G. *et al.* Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, v. 99, p. 38-50, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008>.

BORGES, W. L. B. *et al.* New Methodologies for the surface application of limestone and gypsum in different crop systems. **Sustainability**, v. 14, n. 14, 8926, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148926>.

BORTOLINI, C. G.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G. Sistemas consorciados de aveia preta e ervilhaca comum como cobertura de solo e seus efeitos na cultura do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 897-903, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400021>.

BROOKES, P. C. *et al.* The mineralisation of fresh and humified soil organic matter by the soil microbial biomass. **Waste Management**, v. 28, n. 4, p. 716-722, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.015>.

CAIRES, E. F. *et al.* Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 125-136, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100013>.

CAIRES, E. F. *et al.* Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agrícola**, v. 68, p. 209-216, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000200011>.

CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. da. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 161-169, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000100018>.

CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A novel phosphogypsum application recommendation method under continuous no-till management in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 5, p. 1987–1995. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.11.0642>.

CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L. I. Determinação de sulfato em solos. In: van RAIJ, B.; ANDRADE, E.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Eds.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Instituto Agrônomo, Campinas, SP, 2001. p. 225–230.

CARNEIRO, R. G. *et al.* A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Applied Soil Ecology**, v. 198, 105394, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394>.

CARVALHO, M. L. *et al.* Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools—a literature review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0230130, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbcS20220130>.

CASAROTTO, R. W. *et al.* Use of geographic and edaphoclimatic information for the selection of soybeans for organic environments in current and future scenarios. **Revista Ceres**, v. 72, e72033, 2025. DOI: <https://doi.org/10.71252/2177-34912025720033>.

CATES, A. M. *et al.* Separate drivers for microbial carbon mineralization and physical protection of carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 133, p. 72-82, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.02.014>.

CELESTINA, C. *et al.* Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: A critical review. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 135-145, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.002>.

CHATAUT, G. *et al.* Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 11, 100533, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533>.

CHEN L.; DICK W. A. Gypsum as an agricultural amendment. The Ohio State University, 2011. Disponível em: <https://fabe.osu.edu/sites/fabe/files/imce/files/Soybean/Gypsum%20Bulletin.pdf>. Acesso em: 16 Ago 2025.

CIAMPITTI, I. A. *et al.* Revisiting biological nitrogen fixation dynamics in soybeans. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 727021, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.727021>.

CIAMPITTI, I. A.; SALVAGIOTTI, F. New insights into soybean biological nitrogen fixation. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, p. 1185-1196, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0348>.

CIOTTA, M. N. *et al.* Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob planejamento direto. **Ciência Rural**, v. 33, p. 1161-1164, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600026>.

CLEMENTE, P. R. A. *et al.* Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 1, p. 110-117, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4742563>.

CONAB – Companhia Nacional De Abastecimento. **Produção de grãos e área plantada da safra 2025/26 mantém perspectiva de novos recordes**. Brasília, DF: Conab, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-e-area-plantada-da-safra-2025-26-mantem-perspectiva-de-novos-recordes>. Acesso em: 17 mar. 2026.

CONDON, L. *et al.* The role of microbial communities in the formation and decomposition of soil organic matter. **Soil microbiology and sustainable crop production**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 81-118. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9479-7_4.

COTRUFO, M. F. *et al.* Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 776-779, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2520>.

CURTIN, D.; BEARE, M. H.; QIU, W. Hot water extractable carbon in whole soil and particle-size fractions isolated from soils under contrasting land-use treatments. **Soil Research**, v. 60, n. 8, p. 772-781, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR21251>.

DA SILVA, A. B.; KASCHUK, G. Soil matrix affects the determination of p-nitrophenol and the estimation of β -glucosidase, arylsulfatase, and acid phosphatase activities in subtropical soils. **Pedobiologia**, v. 110, 151050, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2025.151050>.

DAL MOLIN, S. J. *et al.* Polyhalite as a potassium and multinutrient source for plant nutrition. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 66, n. 5, p. 667-678, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1631451>.

DANG, Y. P. *et al.* No-till farming systems for sustainable agriculture: an overview. No-till farming systems for sustainable agriculture: Challenges and opportunities. **Springer Nature**, p. 3-20, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-46409-7_1.

DANG, Y. P.; DALAL, R. C.; MENZIES, N. W. No-till farming systems for sustainable agriculture: challenges and opportunities. **Springer Nature**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46409-7>.

DARYANTO, S. *et al.* Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 357-373, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.013>.

DE ALMEIDA, R. F.; NAVES, E. R.; DA MOTA, R. P. Soil quality: Enzymatic activity of soil β -glucosidase. **Global Journal of Agricultural Research and Reviews**, v. 3, n. 2, p. 146-450, 2015. Disponível em: <http://www.globalscienceresearchjournals.org/>.

DE SOUSA FERREIRA, L. *et al.* The nutrient magnesium in soil and plant: a review. **International Journal Plant Soil Science**, v. 35, n. 8, p. 136-144, 2023. DOI: <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i82890>.

DERPSCH, R. *et al.* No-tillage and conservation agriculture: a progress report. **No-till farming systems. Special publication**, v. 3, p. 7-39, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284459787_No-tillage_and_conservation_agriculture_A_progress_report. Acesso em: 10 dez 2025.

DEWI, R. K. *et al.* Soil carbon sequestration and soil quality change between no-tillage and conventional tillage soil management after 3 and 11 years of organic farming. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 68, n. 1, p. 133-148, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1997552>.

DHUGGA, K. S. Maize biomass yield and composition for biofuels. **Crop Science**, v. 47, n. 6, p. 2211-2227, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.05.0299>.

DIGNAC, M. *et al.* Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review: Soil C storage: mechanisms, practices and proxies. **Agronomy for sustainable development**, v. 37, n. 2, 14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>

DUVICK, D. N. The Contribution of Breeding to Yield Advances in maize (*Zea mays* L.). **Advances in Agronomy**, v. 86, p. 83-145, 2005. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)86002-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)86002-X).

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, p. 601–606, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90141-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Enxofre: Nutriente necessário para maiores rendimentos da soja. **Circular Técnica**. n. 53. p. 6, Londrina: EMBRAPA-Soja, 2007.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Trigo**. 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/trigo1>. Acesso em: 19 jun 2025.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema plantio direto**. Londrina: Embrapa Soja, p. 8, 2019. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1101765/1/Sistemaplantio.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dados econômicos da soja. Londrina, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 8 maio 2026.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in brazilian acid soils for sustainable crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 32 (7–8), 1303–1319, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1081/CSS-100104114>.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. S. Chapter Six - Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. **Advances in Agronomy**, v. 128, p. 221-275, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>.

FANG, C; KONG, F. Soybean. **Current Biology**, v. 32, n. 17, p. 902-904, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.06.054>.

FANIN, N. *et al.* Soil enzymes in response to climate warming: Mechanisms and feedbacks. **Functional Ecology**, v. 36, n. 6, p. 1378-1395, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14027>.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crops and livestock products. Rome, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 8 maio 2026.

FILHO, A. P.; FILHO, M. R. A. Rotação de Culturas. **Embrapa Milho e Sorgo**. Sete Lagoas. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/rotacao-de-culturas>. Acesso em: 16. jun. 2025.

FOLLETT, R. F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. **Soil & Tillage Research**, v. 61, n. 1-2, p. 77-92, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00180-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00180-5).

FONTANA, M.B. *et al.* Cover crop benefit bacteria and increase aggregate-associate soil C and N storage. **Geoderma Regional**, v. 36, e00743, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00743>.

FRANCAVIGLIA, R.; ALMAGRO, M.; VICENTE-VICENTE, J. L. Conservation agriculture and soil organic carbon: Principles, processes, practices and policy options. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, 17, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017>.

GARBEVA, P.; VAN VEEN J. A.; VAN ELSAS J. D. Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. **Annual Reviews Phytopathology**, v. 42, n. 1, p. 243-270, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.012604.135455>.

GASHI, N. *et al.* Gypsum and tillage practices for combating soil salinity and enhancing crop productivity. **Agriculture**, v. 15, n. 6, 658, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15060658>.

GHANI, A.; DEXTER, M.M.; PERROTT, K. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, p. 1231–1243, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00186-X).

GILLER, Ken E. *et al.* Beyond conservation agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 870, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00870>.

GROTE, U. *et al.* Food Security and the Dynamics of Wheat and Maize Value Chains in Africa and Asia. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, 617009, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.617009>.

HAGEMANN, T. R. *et al.* Potencial alelopático de extratos aquosos foliares de aveia sobre azevém e amendoim-bravo. **Bragantia**, v. 69, p. 509-518, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000300001>.

HAGERTY, S. B.; ALLISON, S. D.; SCHIMEL, J. P. Evaluating soil microbial carbon use efficiency explicitly as a function of cellular processes: implications for measurements and models. **Biogeochemistry**, v. 140, n. 3, p. 269-283, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0489-z>.

HOBBS, P.R.; SAYRE, K.; GUPTA, R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, p. 543–555, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>.

HOFFLAND, E. *et al.* Eco-functionality of organic matter in soils. **Plant and Soil**, v. 455, n. 1, p. 1-22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>.

HUSSAIN, A. *et al.* The importance of soil organic matter (som) on soil productivity and plant growth. **Biological and Agricultural Sciences Research Journal**, v. 2023, n. 1, 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54112/basrj.v2023i1.11>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Safra de 2025 é recorde e previsão para 2026 é 1,8% menor**. Rio de Janeiro: IBGE, 2026a. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/45674-safra-de-2025-e-recorde-e-previsao-para-2026-e-1-8-menor>. Acesso em: 17 mar. 2026.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Em fevereiro, IBGE estima que a safra nacional chegará a 344,1 milhões de toneladas em 2026**. Agência de Notícias. 2026b. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/46079-em-fevereiro-ibge-estima-que-a-safra-nacional-chegara-a-344-1-milhoes-de-toneladas-em-2026>. Acesso em: 20 mar. 2026.

IGREJAS, G. *et al.* Wheat quality for improving processing and human health. Berlin/Heidelberg, Germany: **Springer**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3>.

INAGAKI, T. M. *et al.* Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 231, p. 156-165, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.034>.

INAGAKI, T. M. *et al.* Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? **Science of the Total Environment**, v. 599–600, p. 523–532, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.234>.

JIAN, J. *et al.* A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 143, 107735, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107735>.

JING, T. *et al.* Role of calcium nutrition in plant Physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions-A comprehensive review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 210, 108602, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108602>.

KARACA, A. *et al.* Soil enzymes as indication of soil quality. In: **Soil enzymology**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 119-148, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_7.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T. An ecologically sustainable approach to agricultural production intensification: Global perspectives and developments. **Field Actions Science Reports**, 2012. Disponível em: <http://journals.openedition.org/factsreports/1382>.

KEMP, S. J. *et al.* An improved approach to characterize potash-bearing evaporite deposits, evidenced in North Yorkshire, United Kingdom. **Economic Geology**, v. 111, n. 3, p. 719-742, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.3.719>.

KHAN, M. T.; ALEINIKOVIENĖ, J.; BUTKEVIČIENĖ, L. Innovative organic fertilizers and cover crops: Perspectives for sustainable agriculture in the era of climate change and organic agriculture. **Agronomy**, v. 14, n. 12, 2871, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14122871>.

KICHEL, A. N.; MIRANDA, C. H. B. Uso da Aveia como Planta Forrageira. Embrapa Gado de Corte, Campo Grande. n. 45. p. 1-5, 2000. DOI: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/325252>. Acesso em: 16 set 2025.

KOPITTKE, P. M. *et al.* Soil is a major contributor to global greenhouse gas emissions and climate change. **Soil**, v. 10, n. 2, p. 873-885, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-10-873-2024>.

KOPRIVA S. *et al.* Interaction of Sulfate Assimilation with Carbon and Nitrogen Metabolism in *Lemna minor*, **Plant Physiology**, v. 130, p. 1406–1413, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.007773>.

KOUDAHE, K.; ALLEN, S. C.; DJAMAN, K. Critical review of the impact of cover crops on soil properties. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 3, p. 343-354, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>.

KUNITO, T. *et al.* Microbial synthesis of arylsulfatase depends on the soluble and adsorbed sulfate concentration in soils. **European Journal of Soil Biology**, v. 111, 103418, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103418>.

LEITSCHUH, B.; STEWART, W. P.; VAN RIPER, C. J. Place-making in the Corn Belt: The productivist landscapes of the “good farmer”. **Journal of Rural Studies**, v. 92, p. 415-424, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.05.002>.

LI, Q. *et al.* Transformation of soil organic matter subjected to environmental disturbance and preservation of organic matter bound to soil minerals: a review. **Journal of Soils and Sediments**, v. 23, n. 3, p. 1485-1500, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03381-y>.

LIU, J. *et al.* Enzyme stoichiometry indicates the variation of microbial nutrient requirements at different soil depths in subtropical forests. **PLoS One**, v. 15, n. 2, e0220599, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220599>.

LU, Y. *et al.* Cover crops in sustainable food production. **Food Reviews International**, v. 16, n. 2, p. 121-157, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1081/FRI-100100285>.

LUIZ A. Z. M. Aveia: Forragem e cobertura do solo. Embrapa, Agropecuária Oeste, Dourados MS, 2000. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/243576/1/COL20003.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2026.

LÜTZOW, M. V. *et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>.

MATVEEVA, V. A.; SMIRNOV, Y. D.; SUCHKOV, D. V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 44, n. 5, p. 1605-1618, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00988-x>.

MAPA - Ministério da Agricultura e Pecuária. Produção agrícola nacional posiciona o Brasil entre os principais produtores e exportadores de alimentos do mundo. Brasília, DF, 20 mar. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/producao-agricola-nacional-posiciona-o-brasil-entre-os-principais-produtores-e-exportadores-de-alimentos-do-mundo>. Acesso em: 8 maio 2026.

MINATO, E. A. *et al.* Lime and gypsum application to low-acidity soils: Changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance. **Soil & Tillage Research**, v. 234, 105860, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105860>.

MISHRA R. *et al.* Soybean (*Glycine max* L. Merrill): A Multipurpose Legume Shaping Our World. **Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology**, v. 25, n. 3-4 p. 17-37, 2024. DOI: <https://doi.org/10.56557/pcbmb/2024/v25i3-48643>.

MOHAMMADI, K. *et al.* Soil management, microorganisms and organic matter interactions: A review. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 86, 19840, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJBX11.006>.

NDEGWA, J. K. *et al.* Integrated soil fertility and water management practices for enhanced agricultural productivity. **International Journal of Agronomy**, v. 2023, n. 1, 8890794, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/8890794>.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. **Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties**, v. 9, p. 539-579, 1982. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>.

NICHOLS, V. A. *et al.* The roots of the rotation effect run deep. **Field Crops Research**, v. 319, 109640, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109640>.

NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 655-663, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400010>.

NURBEKOV, A. *et al.* No-till, crop residue management and winter wheat-based crop rotation strategies under rainfed environment. **Frontiers in Agronomy**, v. 6, 1453976, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1453976>.

NURUZZAMAN, M.; BAHAR, M. M.; NAIDU, R. Diffuse soil pollution from agriculture: Impacts and remediation. **Science of the Total Environment**, v. 962, 178398, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178398>.

OKORIE, B. O.; NIRAJ, Y. Effects of different tillage practices on soil fertility properties: A review. **International Journal of Agriculture and Environmental Research**, v. 8, n. 1, p. 176-193, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.333826>.

OLIVEIRA, S. M. P. *et al.* Efeito residual no solo do uso de polihalita na adubação de soqueira de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 55, e81758, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632025v5581758>.

OLIVEIRA, S. M. P. *et al.* Polyhalite as a Potassium Source for Fertilization of Ratoon Cane in a Cerrado Oxisol. **Agronomy**, v. 16, n. 1, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy16010001>.

ONDULLA, T. T. *et al.* Current Agronomic Practices, Harvest & Post-Harvest Processing of Soybeans (*Glycine max*) - A Review. **Agronomy**, v. 13, n. 2, 427, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020427>.

PAVAN, M. A. *et al.* Manual de análise química do solo e controle de qualidade. IAPAR Circ. 76. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR), p. 38, 1992.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 4, n. 2, p. 439–473, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.

PIAS, O. H. C. *et al.* Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 675-692, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20125>.

PICCOLO, A.; DROSOS, M. The essential role of humified organic matter in preserving soil health. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 12, n. 1, 21, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-025-00730-0>.

PODYMA, W. *et al.* A multilevel exploration of *Avena strigosa* diversity as a prelude to promote alternative crop. **BMC plant biology**, v. 19, n. 1, 291, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1819-6>.

POSSAMAI, E. J. *et al.* Adoção do sistema plantio direto no Paraná: uma revisão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0210104, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210104>.

PRAKASH, S.; VERMA, J. P. Global perspective of potash for fertilizer production. **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**. New Delhi: Springer Índia, 2016. p. 327-331. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2>.

PRIBYL, D. W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, v. 156, n. 3-4, p. 75-83, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>.

RAZA, S. *et al.* Missing the input: the underrepresentation of plant physiology in global soil carbon research. **Soil**, v. 11, n. 1, p. 363-369, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-11-363-2025>.

ROBERTSON, G. P.; PAUL, E. A. Decomposition and soil organic matter dynamics. **Methods in ecosystem science**. New York, NY: Springer New York, 2000. p. 104-116. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1224-9_8.

RODRIGUEZ B. C. *et al.* Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. **Soils Systems**, v. 6, 87, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040087087>.

SÁ, J. C. M. *et al.* 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.010>.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018, p. 356. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. **Plants**, v. 10, n. 2, 419, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020419>.

SHAH, K. K. *et al.* Diversified crop rotation: an approach for sustainable agriculture production. **Advances in Agriculture**, v. 2021, n. 1, 8924087, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8924087>.

SHAKOOR A. *et al.* A global meta-analysis of greenhouse gases emission and crop yield under no-tillage as compared to conventional tillage. **Science of The Total Environment**, v. 750, 142299, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142299>.

SHRUTHI N. B. *et al.* The benefits of gypsum for sustainable management and utilization of acid soils. **Plant and Soil**, v. 504, n. 1, p. 5-28, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06907-0>.

SITKO, K. *et al.* Influence of short-term macronutrient deprivation in maize on photosynthetic characteristics, transpiration and pigment content. **Scientific Reports**, v. 9, 14181, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50579-1>.

SOUZA, I. M. D. *et al.* Methodologies for Agricultural Gypsum Application Recommendations in No-Tillage Systems on Tropical Sandy Soils. **Agronomy**, v. 15, n. 2, 416, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15020416>.

SNAPE, J. W.; PÁNKOVÁ, K. *Triticum Aestivum L.* (Wheat). **eLS**, 2013. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0003691.pub2>.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 34, n. 2, p. 225-229, 1970. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400020016x>.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. **Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties**, v. 5, p. 775-833, 1994. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed., Porto Alegre, Artmed, 2021.

TAO, F. *et al.* Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. **Nature**, v. 618, n. 7967, p. 981-985, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06042-3>.

THAPA, B.; DURA, R. A review on tillage system and no-till agriculture and its impact on soil health. **Archives of Agriculture and Environmental Science**, v. 9, n. 3, p. 612-617, 2024. DOI: <https://doi.org/10.26832/24566632.2024.0903028>.

TIECHER, T. *et al.* Crop Response to Gypsum Application to Subtropical Soils Under No-Till in Brazil: a Systematic Review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170025, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170025>.

TIROL-PADRE, A.; LADHA, J. K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 3, p. 969-978, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.9690>.

TÓTH, B. *et al.* The influence of soil acidity on the physiological responses of two bread wheat cultivars. **Plants**, v. 9, n. 11, 1472, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9111472>.

TURNER, B. L. *et al.* β -Glucosidase activity in pasture soils. **Applied Soil Ecology**, v. 20, n. 2, p. 157-162, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00020-3).

UGRENOVIĆ, V. *et al.* Black oat (*Avena strigosa* Schreb.) ontogenesis and agronomic performance in organic cropping system and Pannonian environments. **Agriculture**, v. 11, n. 1, 55, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11010055>.

USHAKOVA, E. *et al.* Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe potash deposit. **Mining**, v. 3, n. 2, p. 176-204, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/mining3020011>.

VALE, F.; SÉRIO, D. R. Introducing polyhalite to Brazil: first steps of a new fertilizer. 2017. Disponível: <https://www.ipipotash.org/publications/eifc-406>. Acesso em: 18 Ago 2025.

VELTEN, S. *et al.* What is sustainable agriculture? A systematic review. **Sustainability**, v. 7, n. 6, p. 7833-7865, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7067833>

VICENSI, M. *et al.* Gypsum rates and splitting under no-till: Soil fertility, corn performance, accumulated yield and profits. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 690-702, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00157-1>.

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETO, J. Manejo do enxofre na agricultura. **Informações Agronômicas**, Internacional Plant Nutrition Institute, v. 52, p. 1-14, 2015.

WANG, C. *et al.* Large-scale importance of microbial carbon use efficiency and necromass to soil organic carbon. **Global Change Biology**, v. 27, n. 10, p. 2039-2048, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15550>.

WANG, P. *et al.* Effects of Maize – Crop Rotation on Soil Physicochemical Properties, Enzyme Activities, Microbial Biomass and Microbial Community Structure in Southwest China. **Microorganisms**, v. 11, n. 11, 2621, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112621>.

XIAO, H. *et al.* Soil extracellular enzyme activities and the abundance of nitrogen-cycling functional genes responded more to N addition than P addition in an Inner Mongolian meadow steppe. **Science of the Total Environment**, v. 759, 143541, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143541>.

XIONG J. *et al.* Response of soil fertility to soil erosion on a regional scale: A case study of Northeast China. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, 140360, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140360>.

XU, H. *et al.* Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China. **Catena**, v. 196, 104812, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104812>.

YANG, J. *et al.* Incorporating crop rotation into the winter wheat-summer maize system to enhance soil multifunctionality and sustainable grain production in the North China Plain. **Field Crops Research**, v. 325, 109834, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109834>.

YANG, X. *et al.* Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, 198, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>.

YAQOOB, N. *et al.* The effects of agriculture productivity, land intensification, on sustainable economic growth: a panel analysis from Bangladesh, India, and Pakistan Economies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 55, p. 116440-116448, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18471-6>.

YERMIYAHU, U. *et al.* Polyhalite as a multi nutrient fertilizer–potassium, magnesium, calcium and sulfate. **Israel Journal of Plant Sciences**, v. 64, n. 3-4, p. 145-157, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1163/22238980-06401001>.

YERMIYAHU, U. *et al.* Solubility of Granular Polyhalite under Laboratory and Field Conditions. **International Potash Institute (IPI) e-ifc**, v. 58, p. 3-9, 2019. Disponível em: <https://www.ipipotash.org/publications/solubility-of-granular-polyhalite-under-laboratory-and-field-conditions>. Acesso em: 15 dez 2025.

YOUSEFI, M.; DRAY, A.; GHAZOUL, J. Assessing the effectiveness of cover crops on ecosystem services: a review of the benefits, challenges, and trade-offs. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 22, n. 1, 2335106, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2335106>.

YUE Q. *et al.* Mitigating greenhouse gas emissions in agriculture: From farm production to food consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p. 1011-1019, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.172>.

ZAMAN, M.; HENG, L.; MÜLLER, C. Measuring emission of agricultural greenhouse gases and developing mitigation options using nuclear and related techniques: Applications of nuclear techniques for GHGs. Cham: Springer, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55396-8>.

ZHAO, F. J.; HAWKESFORD, M. J.; MCGRATH, S. P. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. **Journal of Cereal Science**, v. 30, n. 1, p. 1-17, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcrs.1998.0241>.

ZHENG, H. *et al.* Litter quality drives the differentiation of microbial communities in the litter horizon across an alpine treeline ecotone in the eastern Tibetan Plateau. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 10029, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28150-1>.

ZHOU, J. *et al.* Frequent carbon input primes decomposition of decadal soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 175, 108850, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108850>.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 144, p. 1-44, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.001>.

ZOU, Y. *et al.* Crop Rotation and Diversification in China: Enhancing Sustainable Agriculture and Resilience. **Agriculture**, v. 14, n. 9, 1465, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091465>.

ZUCCARINI, P. *et al.* Altered activities of extracellular soil enzymes by the interacting global environmental changes. **Global Change Biology**, v. 29, n. 8, p. 2067-2091, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16604>.

