

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ISABELLI CRISTINI DOS SANTOS

**EFEITO RESIDUAL DE MIX DE COBERTURA INOCULADO COM
MICROORGANISMOS E FEIJÃO NO CARBONO E ATRIBUTOS DO SOLO ARENOSO**

Ilha Solteira
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ISABELLI CRISTINI DOS SANTOS

**EFEITO RESIDUAL DE MIX DE COBERTURA INOCULADO COM
MICRORGANISMOS E FEIJÃO NO CARBONO E ATRIBUTOS DO SOLO ARENOSO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Linha de pesquisa: Manejo e Conservação do Solo e da Água

Orientadora: Prof Dr^a Carolina dos Santos Batista Bonini

Ilha Solteira
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S237e Santos , Isabelli Cristini dos.
Efeito residual de mix de cobertura inoculado com microrganismos e feijão no carbono e atributos do solo arenoso / Isabelli Cristini dos Santos -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
64 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agronômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Manejo e conservação do Solo e da água , 2026

Orientador: Carolina dos Santos Batista Bonini

Inclui bibliografia

1. Agregados . 2. Matéria orgânica . 3. Segurança alimentar .

Impacto potencial desta pesquisa

Essa pesquisa pode colaborar diretamente com as alternativas sustentáveis para aumentar os estoques de carbono no solo e reduzir os danos causados pela liberação dos gases do efeito estufa e do aumento das mudanças climáticas além de aumentar a produtividade do Feijão-comum utilizando alternativas naturais como os microrganismos e plantas de cobertura.

Potential impact of this research

This research can directly contribute to safe alternatives for increasing soil carbon stocks and reducing the damage caused by the release of greenhouse gases and increased climate change, as well as increasing the productivity of common beans using natural alternatives such as microorganisms and cover crops.

Impacto potencial de esta investigación

Esta investigación puede contribuir directamente a alternativas seguras para aumentar las reservas de carbono del suelo y reducir el daño causado por la liberación de gases de efecto invernadero y el aumento del cambio climático, así como aumentar la productividad del frijol común utilizando alternativas naturales como microorganismos y cultivos de cobertura.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EFEITO RESIDUAL DE MIX DE COBERTURA INOCULADO COM MICRORGANISMOS E FEIJÃO NO CARBONO E ATRIBUTOS DO SOLO ARENOSO

AUTORA: ISABELLI CRISTINI DOS SANTOS

ORIENTADORA: CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI**
Data: 09/02/2026 09:09:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / UNESP / Câmpus de Dracena - FCAT

Documento assinado digitalmente
 **VAGNER DO NASCIMENTO**
Data: 06/02/2026 16:18:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. VAGNER DO NASCIMENTO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / UNESP / Câmpus de Dracena - FCAT

Documento assinado digitalmente
 **JESSICA PIGATTO BARCELOS PUTTI**
Data: 06/02/2026 16:38:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. JÉSSICA PIGATTO DE QUEIRÓZ BARCELOS (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia / Universidade do Oeste Paulista - UNOESTE

Ilha Solteira, 29 de janeiro de 2026.

Dedico esse trabalho a meu avô Adelaido Guilhermino dos Santos,
por ter sido a pessoa que mais acreditou em mim em todo o mundo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer à Deus por me conceder saúde para realizar esse trabalho, pela perseverança em todos os momentos, pela sabedoria para lidar com os obstáculos e por me guiar em toda a trajetória.

Agradeço a UNESP campus de Dracena por fornecer toda a estrutura para a condução do experimento em campo e em laboratório de física do solo, e a todos os funcionários do campus pelo carinho e receptividade.

Agradeço a minha orientadora Prof Dr^a Carolina dos Santos Batista Bonini por todo o apoio, gentileza, aprendizado e confiança durante todo o experimento e análises e aos meus colegas de grupo de pesquisa de Física do Solo de Dracena pela ajuda em todas as etapas do projeto, sem eles não conseguiria realizar sozinha.

Agradeço aos meus amigos da vida de tanto tempo e companheiros de mestrado Kauan Augusto Ceriani de Luna e Thayná Sayuri Shinohara por todo o apoio e companheirismo durante as aulas e por trazerem conforto e leveza em todos os momentos.

Agradeço a todos os meus amigos por estarem presentes em todos os momentos da minha vida, inclusive durante toda essa trajetória, por tornarem cada momento difícil um pouco mais fácil e por todo o apoio e motivação ao decorrer do caminho. Especialmente, a minha querida amiga Júlia Cristina Silva Rondolfo dos Santos por todo amor e carinho de anos e por tornar as minhas pequenas conquistas sempre grandes conquistas.

E minha eterna gratidão a toda a minha família por todo o suporte, amor, carinho e minha maior motivação para conquistar todos os meus sonhos. Especialmente a minha mãe Zeneide Maria Paes dos Santos, minha avó Maria José da Paz Santos e meu avô Adelaido Guilhermino dos Santos (*in memoriam*), que são as pessoas que mais acreditam em mim e merecem todas as homenagens do mundo.

Esse projeto de pesquisa foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) com código de financiamento - 88887.003570/2024-00.

RESUMO

O solo possui uma multifuncionalidade única, tornando-o base para a produção agrícola e para segurança alimentar mundial, além da sustentabilidade, como na mitigação das mudanças climáticas. Os solos arenosos limitam essa multifuncionalidade e as plantas de cobertura auxiliam no processo de restituição da estrutura desses solos, sendo potencializadas pela inoculação de microrganismos solubilizadores de fosfato (MSPs) além da ciclagem de nutrientes no sistema de sucessão com o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). Presuma-se que essa associação potencialize os benefícios dos mixes, promovendo maior estabilidade de agregados, retenção de água e aporte de carbono no solo. O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito residual das diferentes combinações de mixes de plantas de cobertura com inoculação de MSPs nas características físicas do solo e no estoque de carbono do solo além da produtividade de grãos do feijão. O experimento foi conduzido no município de Dracena/SP, na área experimentação da UNESP, na safra de 2023/24, o solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de textura arenosa. Os tratamentos foram compostos por 3 mixes com diferentes arranjos de espécies de plantas de cobertura, sendo: Mix 1 (*Crambe* spp., *Crotalaria ochroleuca*, *Eleusine coracana*, *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucum* e *Raphanus sativus*); Mix 2 (*Crambe* spp., *Crotalaria breviflora*, *Crotalaria ochroleuca*, *Eleusine coracana*, *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucum*, e *Urochloa ruziziensis*) e Mix 3 (*Crambe* spp., *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucum*, *Raphanus sativus*, *Sorghum bicolor* (forrageiro) e *Vigna unguiculata*) combinados com a presença e ausência da inoculação via semente com MSPs, em um delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 3x2. As avaliações de solo foram realizadas nas camadas de 0 – 0,05; 0,05 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m, incluindo densidade e porosidade do solo, estabilidade de agregados, taxa de infiltração de água no solo, matéria seca da parte aérea dos mixes, produtividade de grãos do feijão, teor de carbono orgânico, matéria orgânica e estoque de carbono no solo. Os resultados demonstraram que o mix 1 e mix 2 com inoculação tiveram maior eficiência em proporcionar melhor estrutura de agregados (DMP, macroagregados) e em aumentar o estoque de carbono no solo. Concluiu-se então que a inoculação com MSPs nos mixes de plantas de cobertura proporcionou maior estoque de carbono e melhora nas características físicas do solo e maior produtividade de grãos do feijão, sendo uma prática promissora para o manejo sustentável e o mix 1 e 2 são as opções mais indicadas para a melhoria da qualidade estrutural de um solo arenoso.

Palavras chave: Agregados; Matéria orgânica; segurança Alimentar.

ABSTRACT

Soil possesses a unique multifunctionality, making it the basis for agricultural production and global food security, as well as sustainability, such as in mitigating climate change. Sandy soils limit this multifunctionality, and cover crops assist in the process of restoring the structure of these soils, being enhanced by the inoculation of phosphate-solubilizing microorganisms (PSMs) in addition to nutrient cycling in the succession system with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). It is presumed that this association enhances the benefits of the mixtures, promoting greater aggregate stability, water retention, and carbon transport in the soil. The objective of this study was to evaluate the residual effect of different molecules in cover crop mixtures with PSMs inoculation on the physical characteristics of the soil and on the soil carbon stock, as well as on bean grain productivity. The experiment was conducted in the municipality of Dracena/SP, in the experimental area of UNESP, during the 2023/24 growing season. The soil is classified as a typical dystrophic Red-Yellow Argisol with a sandy texture. The treatments consisted of 3 mixtures with different arrangements of cover crop species, namely: Mixture 1 (*Crambe* spp., *Crotalaria ochroleuca*, *Eleusine coracana*, *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucum* and *Raphanus sativus*); Mixture 2 (*Crambe* spp., *Crotalaria breviflora*, *Crotalaria ochroleuca*, *Eleusine coracana*, *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucum* and *Urochloa ruziziensis*) and Mixture 3 (*Crambe* spp., *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucum*, *Raphanus sativus*, *Sorghum bicolor* (forage grass), and *Vigna unguiculata*) combined with the presence and absence of seed inoculation with PSMs, in a randomized block design (RBD), in a 3x2 factorial scheme. Soil evaluations were carried out in the 0–0.05 m layers; The study evaluated soil density, aggregate stability, water infiltration rate, shoot dry matter of the mixes, bean grain yield, organic carbon content, organic matter, and soil carbon stock, with dimensions of 0.05–0.10 m and 0.10–0.20 m respectively. Results showed that mix 1 and mix 2 with inoculation provided greater efficiency in improving aggregate structure (MWD, macroaggregates) and increasing soil carbon stock. It concluded that inoculation with PSMs in cover crop mixtures provided greater carbon stock, improved soil physical characteristics, and higher bean grain yield, representing a promising practice for sustainable management. Mixes 1 and 2 are the most suitable for improving the structural quality of sandy soil.

Keywords: Aggregates; Organic matter; Food security.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Foto de satélite da área experimental da UNESP de Dracena/SP	25
Figura 2 - Perfil climático mensal do período de nov/2023 a set/2024.....	26
Figura 3 - Proporção de famílias dentro dos mixes (plantas/m ²)	28
Figura 4 - Imagem ilustrativa das etapas da condução do experimento (nov/2023 – set/2024)	29
Figura 5 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) no estoque de carbono orgânico do solo (ECO).....	34
Figura 6 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,20 m) no atributo de DMP.....	38
Figura 7 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs na camada de 0 – 0,05 m e 0,10 – 0,20 m no atributo de macroporosidade	41
Figura 8 - três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs na camada 0,10 – 0,20 m no atributo de macroporosidade	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química da área experimental	27
Tabela 2 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) na quantidade de carbono orgânico e matéria orgânica do solo	33
Tabela 3 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) na análise de $\delta^{13}\text{C}$, sem estatística	36
Tabela 4 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs na matéria seca da parte aérea (MSPA) e produtividade de grãos do feijão	37
Tabela 5 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) nos atributos de estabilidade de agregados do solo (macro e microagregados).....	40
Tabela 6 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) nos atributos de porosidade total do solo (PTS) e densidade do solo (DS)	44
Tabela 7 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs na taxa de infiltração de água no solo	45

LISTAS DE ABREVIATURAS

^{12}C – Carbono doze

^{13}C – Carbono treze

COS – Carbono orgânico do solo

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

DMP – Diâmetro médio ponderado

DS – Densidade do solo

ECO – Estoque de carbono orgânico do solo

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

M.O.S – Matéria orgânica do solo

MA – Macroporosidade do solo

MI – Microporosidade do solo

MSPA – Matéria seca da parte aérea

MSPs – Microrganismos solubilizadores de fosfato

PTS – Porosidade total do solo

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 ATRIBUTOS DE SOLOS ARENOSOS E DINÂMICA DO CARBONO NO SOLO	14
3.1.1. Limitações dos solos arenosos	14
3.1.2 Estoque de carbono como indicador de qualidade e sustentabilidade	15
3.1.3. Monitoramento via Isótopos Estáveis ($\delta^{13}\text{C}$)	16
3.2 SISTEMAS DE PLANTAS DE COBERTURA	17
3.2.1. Papel das plantas de cobertura na proteção do solo e atributos físicos	17
3.2.2. Aporte de matéria orgânica e estabilização de agregados	18
3.2.3. Potencial do cultivo de mixes de plantas de cobertura	18
3.2.4. Características botânicas das espécies utilizadas	19
3.3 BIOTECNOLOGIA: INOCULAÇÃO COM MICRORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO	22
3.3.1. Microrganismos solubilizadores de fosfato (MSPs)	22
3.3.2. Gênero <i>Bacillus</i> na estruturação dos solos	22
3.5.1 <i>Bacillus megaterium</i> e <i>Bacillus subtilis</i>	23
3.4 FEIJÃO-COMUM EM SUCESSÃO: EFEITO RESIDUAL	24
3.4.1 Sensibilidade edafoclimática do feijão-comum <i>Phaseolus vulgaris</i>	24
3.4.2. Efeito residual das plantas de cobertura	24
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	25
4.2 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	26
4.3 AVALIAÇÕES	30
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	31
5. RESULTADOS	31
5.1 CARBONO NO SOLO	31
5.2 MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA DOS MIXES E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO	36

5.3 ESTABILIDADE DE AGREGADOS DO SOLO	37
5.4 POROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO	41
6. DISCUSSÃO	45
7. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural e indispensável para a produção agrícola, fornecendo suporte físico às plantas, nutrientes, água e processos biológicos através da sua microbiota. Mas não se limita somente a isso, possui papel importante no ecossistema e na sustentabilidade dos sistemas agrícolas, como também na mitigação das mudanças climáticas (Lima, 2025). O solo também é um dos maiores reservatórios de carbono terrestre do mundo, pode armazenar três vezes mais carbono do que a atmosfera, portanto o carbono do solo é um dos principais pilares do ciclo global do carbono (Sanderman *et al.*, 2017). Destacando-se como a principal base para a segurança alimentar mundial.

No entanto, essa multifuncionalidade em solos com textura arenosa possui limitações devido sua baixa fertilidade, acidez elevada e presença de alumínio tóxico, prejudicando a produtividade das culturas, possui também capacidade de armazenamento de água e nutrientes reduzida (Huang e Hartemink, 2020). Além de serem solos mais suscetíveis aos processos erosivos, principalmente quando descobertos, pois, a baixa coesão entre suas partículas, facilita o arraste pela ação da água e dos ventos (Centeno *et al.*, 2017).

A partir disso, a produção de biomassa vegetal na superfície de solos arenosos tem ganhado destaque no Brasil e no Mundo (Marris, 2022; Holanda, Vargas e Granada, 2023). As plantas de cobertura são amplamente utilizadas com a intenção principalmente de melhorar a qualidade do solo, atuando nos atributos físicos, químicos e biológicos (Hansen *et al.*, 2023). Seus benefícios se dão através da produção de biomassa, capacidade de acumular nutrientes participando da ciclagem de nutrientes do solo e do sistema radicular (Silva *et al.*, 2021; Hansen *et al.*, 2023). A palhada formada na superfície dos solos protege o solo dos processos erosivos, aumentam a diversidade e quantidade de microrganismos e aumentam o aporte de matéria orgânica e carbono no solo (Bertolino, 2019). A qualidade dos resíduos deixados pelas plantas de cobertura influencia no estoque de carbono do solo, a composição química como lignina, hemicelulose e celulose regulam a taxa de decomposição, que afeta diretamente no acúmulo do carbono orgânico no solo (Carvalho *et al.*, 2011, 2013, 2022a).

Essas plantas de cobertura podem ser cultivadas de forma isolada ou pelo cultivo de diferentes espécies ao mesmo tempo (mixes), tornando-se essa a forma de cultivo mais

vantajosa, por conta da maior diversidade radicular, disponibilidade de nutrientes e cobertura vegetal, principalmente combinando o uso de leguminosas que auxiliam na disponibilidade acelerada de nutrientes ao solo e as gramíneas que fornecem cobertura vegetal por períodos longos e maior produção de biomassa vegetal (Ziech *et al.*, 2015). Além de outras famílias que vêm sendo utilizadas como plantas de cobertura, como as Brassicaceae que contribuem com seu sistema radicular pivotante e profundo e auxiliam na descompactação do solo e outras características físicas e as Polygonaceae com seu sistema radicular fasciculado que auxiliam na agregação do solo.

Todos os benefícios do uso dos mixes de plantas de cobertura para o solo, resulta em um “efeito residual” para as culturas sucessoras. Nesse caso, a escolha do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) como cultura sucessora auxilia como um indicador de eficiência do sistema de sucessão, em razão da sua sensibilidade as condições edafoclimáticas. Além de possuir grande importância econômica e social no Brasil, sendo o maior produtor e consumidor do feijão no mundo, é uma leguminosa e possui capacidade de fixação biológica de nitrogênio, através da simbiose de suas raízes com bactérias fixadoras de nitrogênio (Araújo *et al.*, 2020). Portanto, também contribui com a fertilidade do solo, exercendo papel importante no efeito residual para a melhoria das características de um solo arenoso.

Em razão da baixa fertilidade de solos arenosos e na busca por alternativas em aumentar o teor de fósforo no solo, além da utilização de fertilizantes fosfatados, os microrganismos solubilizadores de fosfato (MSPs) tem se destacado, principalmente por não causarem danos ao meio ambiente e serem de baixo custo. Eles solubilizam os fosfatos minerais que foram fixados nos solos e não podem ser absorvidos pelas plantas (Pineda, 2014). E as plantas por sua vez, liberam açúcares e ácidos orgânicos, indispensáveis para o crescimento desses microrganismos, que possui um papel ecológico essencial (Carvalho *et al.*, 2016). Além de disponibilizar fósforo, também atuam na estabilização de agregados do solo através das substâncias poliméricas extracelulares (EPS) liberadas por eles, que agem como cola biológica e auxiliam na união das partículas, formando macroagregados e são também bactérias promotoras de crescimento vegetal, produzindo fitohormônios que promovem um maior desenvolvimento das raízes (Zecchin *et al.*, 2026; Kumar *et al.*, 2025).

Presume-se então que a inoculação de MSPs em todos os mixes de plantas de cobertura potencialize a formação de macroagregados, aumentando a estabilidade de agregados do solo e a retenção de água de um solo arenoso e aumente o aporte de carbono e o estoque de carbono

do solo. Porém estima-se que o mix 2 contribua mais significativamente devido à grande presença de espécies de gramíneas, que produzem grande quantidade de biomassa vegetal além de possuir sistema radicular profundo, favorecendo o incremento de matéria orgânica e melhorando as características físicas do solo arenoso ao longo do perfil do solo e consequentemente a produtividade do feijão-comum.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito residual da utilização de mixes de espécies de plantas de cobertura, associada à ausência e presença da inoculação com microrganismos solubilizadores de fosfato, sobre a qualidade (atributos físicos e químicos, e estoque de carbono) de um Argissolo Vermelho Amarelo, textura arenosa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar o estoque de carbono no solo em função das diferentes combinações de mixes de plantas de cobertura e inoculação com MSPs.
- Analisar a influência da interação entre os mixes de plantas de cobertura e a inoculação com MSPs nas características físicas e químicas do solo.
- Analisar a influência da interação entre os mixes de plantas de cobertura e a inoculação com MSPs na produtividade de grãos do feijão-comum.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ATRIBUTOS DE SOLOS ARENOSOS E DINÂMICA DO CARBONO NO SOLO

3.1.1. Limitações dos solos arenosos

O solo é um recurso natural e indispensável para a produção agrícola, fornecendo suporte físico às plantas, nutrientes, água e processos biológicos através da sua microbiota (Lima, 2025). Por isso, com o aumento da população e a necessidade de crescimento e expansão agrícola, o uso de práticas inadequadas e excessivas nos solos, têm causado perdas de biodiversidade e principalmente de saúde de solo (Bisht et al., 2023; Kopittke et al., 2019). As principais consequências e fatores de degradação incluem a erosão do solo, salinização, perda de nutrientes e contaminação por metais pesados (Uasman et al., 2020).

Neste contexto, a utilização de áreas com solos arenosos para as práticas agrícolas, com o intuito de atender à demanda mundial de produção de alimentos se tornam essenciais, além da utilização de alternativas sustentáveis que melhorem a saúde desses solos e sua estrutura, que é considerada frágil além de serem solos de baixa fertilidade, são fatores cruciais para manter a base de segurança alimentar mundial (Holanda et al., 2023).

Os solos arenosos são mais suscetíveis aos processos erosivos, principalmente quando descobertos, pois, a baixa coesão entre suas partículas, facilita o arraste pela ação da água e dos ventos (Centeno et al., 2017). Além de possuírem baixa fertilidade natural, por conta da sua baixa capacidade de troca catiônica e saturação de bases, outros fatores também afetam sua fertilidade, como a matéria orgânica, cobertura vegetal e manejo de solo (Huang & Hartemink, 2020). As suas maiores limitações em relação ao cultivo, são principalmente a baixa retenção de água e perda de nutrientes por lixiviação, além da baixa quantidade de fósforo, nutriente que possui dificuldade de se associar as partículas de areia, por conta dos baixos teores de argila nesses solos (Klein, 2014).

A restauração da matéria orgânica em solos arenosos, portanto, se torna uma alternativa e prática crucial para melhorar a estrutura do solo, estimula a comunidade microbiana e também é um indicativo de qualidade do solo por conta dos seus componentes principalmente o carbono particulado e ácido húmico (Duval et al., 2020; Sato et al., 2019).

3.1.2 Estoque de carbono como indicador de qualidade e sustentabilidade

Os estoques de carbono orgânico do solo são indicadores além de qualidade do solo, mas de sustentabilidade, como mitigação das mudanças climáticas no mundo (Rodrigues *et al.*, 2023). Estudos mostram que as plantas de cobertura têm influenciado nos estoques de carbono, principalmente as gramíneas que favorecem o acúmulo do carbono ao longo dos anos (Souza *et al.*, 2024).

Devido ao aumento de aproximadamente 47% da concentração de CO₂ na atmosfera, o aquecimento global e as mudanças climáticas foram intensificadas (Forster *et al.*, 2021). O setor agrícola contribui com cerca de 14% e 10% do uso da terra e a agricultura na emissão dos gases de efeito estufa, portanto é necessário alternativas para que essa contribuição seja reduzida (Lynch *et al.*, 2021;).

O solo é um dos maiores reservatórios de carbono terrestres do mundo, pode armazenar três vezes mais carbono do que a atmosfera, portanto o carbono do solo é um dos principais pilares do ciclo global do carbono (Sanderman *et al.*, 2017). O ciclo do carbono no solo se deve pela entrada através da decomposição de resíduos vegetais e pode ser perdido pela mineralização que é realizada pelos microrganismos (Chowdhury *et al.*, 2021; Bhattacharyya *et al.*, 2022). O acúmulo do carbono se deve principalmente a solos com sistema de plantio direto e uso de alternativas como as plantas de cobertura, a depender também das características do solo e do clima (Paustian *et al.*, 2019; Carvalho *et al.*, 2023).

Porém a qualidade dos resíduos deixados pelas plantas de cobertura influencia no estoque de carbono do solo, a composição química como lignina, hemicelulose e celulose regulam a taxa de decomposição, que afeta diretamente no acúmulo do carbono orgânico no solo (Carvalho *et al.*, 2011, 2013, 2022a). Além da relação C/N das plantas de cobertura que regulam a velocidade de decomposição dos resíduos, as espécies que possuem uma decomposição mais lenta podem proporcionar maior acúmulo de carbono ao longo dos anos (Adhikari *et al.*, 2024).

3.1.3. Monitoramento via Isótopos Estáveis ($\delta^{13}\text{C}$)

O carbono apresenta diversos isótopos que são utilizados para vários fins, principalmente para estudos ambientais. Os mais comuns na natureza são o ^{12}C , ^{13}C e ^{14}C e os mais estáveis são o ^{12}C e ^{13}C que apresentam abundância relativa de aproximadamente 98,98% e 1,10% respectivamente. A abundância relativa entre esses isótopos é representada pela notação δ e quantifica a razão de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ em relação a um padrão internacional de referência com um valor conhecido que é o Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) (Novello *et al.*, 2021).

O estudo das razões isotópicas de carbono e nitrogênio na matéria orgânica do solo tem aumentado para conseguir compreender a dinâmica dos ecossistemas (Bruggemann *et al.*, 2011). O ^{13}C pode indicar a cobertura vegetal predominante do solo (Oliveira *et al.*, 2021). Isso significa que esse isótopo representa o caminho metabólico de CO_2 que cada planta realiza de acordo com seu metabolismo (C3, CAM ou C4). As plantas geralmente tendem a rejeitar o isótopo ^{13}C e preferem o ^{12}C , a diferença está na proporcionalidade, onde plantas C3 rejeitam mais o isótopo ^{13}C em relação as plantas C4 e as CAM, quanto maior a rejeição das plantas, maior o valor será negativo (Santos, *et al.*, 2025). Além do metabolismo, a temperatura e disponibilidade de água também podem influenciar nos valores de $\delta^{13}\text{C}$, maior disponibilidade

de água faz com que os estômatos consigam ficar mais tempo abertos, resultando em menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ na vegetação e no solo e o contrário ocorre quando há muita presença de luz, na qual os estômatos ficam mais tempo fechados e aumentam os valores de $\delta^{13}\text{C}$ (Santos *et al.*, 2025).

3.2 SISTEMAS DE PLANTAS DE COBERTURA

3.2.1. Papel das plantas de cobertura na proteção do solo e atributos físicos

As plantas de cobertura são amplamente utilizadas com a intenção principalmente de melhorar a qualidade do solo, atuando nos atributos físicos, químicos e biológicos (Hansen *et al.*, 2023). Seus benefícios se dão através da produção de biomassa e capacidade de acumular nutrientes participando da ciclagem de nutrientes do solo (Silva *et al.*, 2021; Hansen *et al.*, 2023).

A palhada formada na superfície dos solos protege o solo dos processos erosivos, proporcionando uma barreira protetora contra o impacto das gotas de chuva, evitando a desagregação das partículas e seu arraste pelo escoamento superficial, além disso, aumentam a diversidade e quantidade de microrganismos do solo (Bertolino, 2019). As plantas de cobertura também influenciam na diminuição da temperatura superficial do solo através da proteção física da palhada, aumentando consequentemente a umidade do solo, sendo benéfico para as raízes. Além do mais, aumentam a disponibilidade de nutrientes importantes como o nitrogênio, através da fixação biológica de nitrogênio pelas leguminosas ou através da ciclagem de nutrientes no solo (Teixeira *et al.*, 2009). As espécies resistentes às secas e as condições edafoclimáticas são importantes para preservar a quantidade de palhada na superfície do solo, pois a temperatura é um limitador da produção e acelera a decomposição dos resíduos vegetais (Carvalho *et al.*, 2009, 2012).

O sistema radicular é o principal fator que interfere nos atributos físicos do solo, a partir da diversidade das raízes que podem ser pivotantes ou fasciculadas, profundas ou rasas. As raízes criam bioporos que controlam o fluxo de água e ar, influenciam a infiltração e retenção de água no solo, além da capacidade de absorver nutrientes em profundidade (Carvalho *et al.*, 2022). Algumas espécies de plantas de cobertura estão sendo utilizadas como uma alternativa ao uso de implementos agrícolas no preparo do solo, pois devido as suas raízes agressivas e

profundas promovem a descompactação do solo igualmente (Souza *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2013).

3.2.2. Aporte de matéria orgânica e estabilização de agregados

Um sistema radicular profundo e agressivo, como das gramíneas, favorecem a resistência à seca das plantas de cobertura, contribui para o acúmulo de carbono no solo em profundidade e aumenta a estabilidade de agregados do solo, contribuições tão importantes quanto a produção de cobertura do solo e a criação de bioporos (Rosolem *et al.*, 2016).

Através das raízes profundas e a grande produção de biomassa, a incorporação da matéria orgânica no solo é beneficiada e favorece também o aumento da agregação das partículas do solo, a matéria orgânica do solo pode ser um indicador de qualidade do solo através dos seus principais componentes como frações de ácido húmico e carbono particulado (Duval *et al.*; 2020.; Sato *et al.*, 2019).

A inclusão das leguminosas no sistema de rotação de culturas como plantas de cobertura também atuam na estabilidade e proteção do carbono, além de fornecerem nitrogênio aos microrganismos que utilizam como energia para sintetizar frações da matéria orgânica do solo, e as concentrações de nitrogênio fornecidas e compostos orgânicos como hemiceluloses e celulose e as ligninas afetam a dinâmica da matéria orgânica do solo pois regulam as taxas de decomposição dos resíduos das culturas (Carvalho *et al.*, 2014).

3.2.3. Potencial do cultivo de mixes de plantas de cobertura

As plantas de cobertura podem ser cultivadas em entre safras, em consórcios, faixas ou sucessão e antecedendo uma cultura comercial ou áreas destinadas aos pousios (Wolschick, 2014). É muito importante a escolha das espécies das plantas de cobertura, é fundamental encontrar os objetivos principais do solo e da cultura comercial cultivada em sucessão, como aumentar o carbono orgânico do solo, suprimento de nitrogênio, diminuir pragas e doenças, características físicas do solo como agregação das partículas e descompactação e conciliar com as características das espécies a serem utilizadas, como profundidade e características do sistema radicular, condições edafoclimáticas, produção de biomassa aérea entre outras características importantes (Calegari, 2002)

O cultivo isolado de uma espécie de planta de cobertura pode apresentar vantagens e desvantagens. As gramíneas produzem uma alta quantidade de biomassa aérea e podem possuir baixo custo para seu cultivo. Porém, por não serem fixadoras biológicas de nitrogênio como as leguminosas, precisam de suplementação de nitrogênio e podem prejudicar a cultura comercial cultivada em subsequência privando o nitrogênio e afetando sua produtividade. Em contrapartida, as leguminosas como plantas de cobertura não precisam da suplementação de nitrogênio, porém produzem baixa quantidade de biomassa que das gramíneas. Da mesma maneira, ocorre com outras famílias, como as Brassicaceae, que tem como principal espécie o *Raphanus sativus* L. (nabo forrageiro) que pode ser um exemplo de um supressor de plantas daninhas e descompactador do solo, porém traz a desvantagem de não ser cultivado no inverno, portanto só produz biomassa ou um crescimento radicular eficiente na primavera/verão. Sendo assim, é difícil uma espécie de planta de cobertura cultivada de forma isolada que possa fornecer todos os benefícios desejados pelas culturas comerciais e pelo solo, portanto, o cultivo de mixes de culturas de plantas de cobertura tem sido utilizado para aproveitar todos os benefícios simultaneamente (Chapagain *et al.*, 2020).

3.2.4. Características botânicas das espécies utilizadas

Para um cultivo de mix de plantas de cobertura ter sucesso é necessário a complementariedade das culturas escolhidas para o sistema. Dentre os fatores importantes a serem considerados para a escolha das espécies, a taxa de semeadura e a competição entre elas são as principais a serem consideradas (Bertolino, 2019). Além da adaptabilidade às condições edafoclimáticas adversas, produção de biomassa e dinâmica de decomposição dos resíduos (Campos, 2014).

O nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) que pertence à família Brassicaceae, tem sido utilizado como adubo verde e planta de cobertura principalmente nas regiões Sul e Centro-Oeste do Brasil e no Estado de São Paulo (Crusciol *et al.*, 2005). É uma planta anual, de crescimento ereto, herbáceo, pode atingir até 1,80m de altura e possui bastante ramificação (Derpsch e Calegari, 1992). Suas raízes são pivotantes e excelentes subsoladores naturais, podem romper camadas compactadas do solo em profundidade (Rios, 2008). Além de produzir grande quantidade de palhada, podendo cobrir aproximadamente 70% da superfície do solo após 60 dias de plantio (Calegari, 1990). Também auxilia na ciclagem de nutrientes do solo, principalmente nitrogênio e fósforo. É uma planta resistente a condições extremas como às

secas e frio. Pode causar a supressão de plantas daninhas, através da inibição do desenvolvimento dessas plantas (Rios, 2008).

O trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*) é uma planta pertencente à família Polygonaceae, de ciclo curto, rústica, herbácea e dicotiledônea e é cultivado mais no estado do Paraná com destaque para a exportação para países europeus e o Japão. Tem grande importância principalmente devido a seu potencial como alimento nutracêutico, dietético e medicinal (FAO, 2011). Porém pode ser utilizado também como planta de cobertura, não tem restrição quanto ao tipo de solo, consegue se desenvolver muito bem em todos os tipos, pois possui tolerância a acidez e conseguem utilizar sais de fósforo e potássio que são poucos solúveis no solo (Alencastro, 2014). Tem valor nutricional semelhante as gramíneas (SILVA *et al.*, 2002) e proporcionam boa cobertura do solo. É uma planta que fácil de ser implementada e conduzida, pois não tem muitas exigências nutricionais, o que o torna ainda mais uma ótima opção de plantas de cobertura e também para incluir no sistema de rotação de culturas (Gonçalves *et al.*, 2014).

O crambe ssp é uma planta pertencente à família Brassicaceae, ciclo anual, possui sistema radicular pivotante e profundo, porte ereto e pode chegar a 0,90m de altura (Perez, 1998) tem boa adaptação a condições climáticas adversas (Souza *et al.*, 2009). Apesar de possuir um sistema radicular profundo, é muito sensível ao alumínio, portanto não consegue se desenvolver em solos pobres ou solos com muita presença de alumínio tóxico, assim como baixos teores de Ca e Mg. Quando o sistema radicular tem um bom desenvolvimento em solos ricos e favoráveis, se torna um importante aliado na ciclagem de nutrientes no solo (Broch e Roscoe, 2010).

O milheto (*Pennisetum glaucum*) é uma planta de cobertura muito utilizada no Brasil, faz parte da família das Poaceae (Gramíneas) e são fundamentais na ciclagem de nutrientes do solo (Silva *et al.*, 2003). Devido ao seu sistema radicular profundo que permite a absorção de nutrientes em profundidade e libera-os depois na superfície do solo através da decomposição de seus resíduos, disponibilizando nutrientes para as culturas subsequentes (Pires *et al.*, 2007). É uma planta que tem boa adaptação a solos pobres e a condições climáticas adversas como altas temperatura e déficit hídrico, dando destaque a seu uso como planta de cobertura.

As crotalárias (*Crotalaria ochroleuca* e *Crotalaria breviflora*) pertencem à família Fabaceae. Apresentam resistência a seca e produzem grande quantidade de palhada e nutrientes na parte aérea. Também tem a capacidade de fornecer nitrogênio para as plantas através da

fixação biológica de nitrogênio que a família das Fabaceae (leguminosas) tem como principal característica. Além disso, são capazes de reduzir a multiplicação de fitonematóides no solo (Foloni *et al.*, 2006).

A *Eleusine coracana* mais conhecida como Capim Coracana é uma planta pertencente à família das gramíneas, possui o mesmo gênero do capim-pé-de-galinha e pode ser conhecido também como capim-pé-de-galinha-gigante (Silva, *et al.*, 2012), pode atingir uma altura de até 1,65 m (Pereira, 2023). Planta de cobertura que melhora as características físicas, químicas e biológicas do solo, promove aumento do teor de matéria orgânica, ciclagem de nutrientes no solo e atua na proteção do solo reduzindo os processos erosivos através da sua cobertura vegetal (Boer *et al.*, 2008).

O capim ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) tem sido muito utilizado no Brasil, pois auxilia na ciclagem de nutrientes do solo e possui alta produção de palhada (Petter *et al.*, 2013; Pariz *et al.*, 2016; Nascente *et al.*, 2018). É sensível ao estresse hídrico, podendo prejudicar o seu crescimento e a produção de biomassa aérea (Macedo *et al.*, 2019; Zuffo *et al.*, 2022, Ben Kalifa *et al.*, 2023).

O sorgo (*Sorghum bicolor* L.) pertence à família das Poaceae (gramíneas), de ciclo anual, possui sistema radicular profundo e fibroso que podem atingir até 1,5 m e podem atingir uma altura de até 4 m. Seu cultivo se destaca por ser uma planta de boa adaptabilidade às condições de secas e à solos mais pobres (Salvador *et al.*, 2021) mesmo em condições desfavoráveis ainda consegue produzir grande quantidade de biomassa. Porém em ambientes de estresse salino, o sorgo acaba perdendo sua capacidade de absorção e assimilação de nutrientes (Sá *et al.*, 2018; Sousa *et al.*, 2022).

Por fim, a espécie do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) que pertence à família das leguminosas, é uma planta herbácea, anual, de ciclo curto e com baixa necessidade hídrica e nutricional e possui uma característica típica de sua família, que é a capacidade de fixação de nitrogênio através da simbiose de bactérias fixadoras com suas raízes (Oliveira *et al.*, 2017). É utilizada como planta de cobertura devido a sua produção de fitomassa e cobertura do solo, participando da ciclagem de nutrientes na relação solo planta (Melo, 2024).

3.3 BIOTECNOLOGIA: INOCULAÇÃO COM MICRORGANISMOS PROMOTORES DE CRESCIMENTO

3.3.1. Microrganismos solubilizadores de fosfato (MSPs)

O uso abundante de fertilizantes fosfatados para resolver a carência de P nos solos têm aumentado os custos de produção além da alta dependência do Brasil na importação desses fertilizantes. Portanto, novas alternativas ao uso de fertilizantes fosfatados têm sido estudadas, para aumentar a disponibilidade de P para as plantas visando diminuir os custos de produção e dependência de fertilizantes e contribuir com a sustentabilidade e maior produtividade agrícola (Souza *et al.*, 2023).

Os microrganismos solubilizadores de fosfato (MSPs) são uma tecnologia alternativa para o uso dos fertilizantes fosfatados. O gênero *Bacillus* spp. é um dos principais atuantes na solubilização do fosfato, onde por meio da liberação de ácidos orgânicos ou mineralização da fração orgânica pela exsudação de enzimas, solubilizam a porção inorgânica e transformam em P disponível para as plantas (Souza *et al.*, 2023). Além disso, também facilitam a mobilização do potássio, em solos com deficiência, aumentando assim a absorção pelas plantas (Kumar *et al.*, 2025).

Através da produção de enzimas, vitaminas e fitormônios os MSPs também são considerados microrganismos promotores de crescimento. Fitormônios como auxinas, citocininas e giberelinas que são importantes na divisão celular, absorção de nutrientes e desenvolvimento radicular. Além do ácido fólico (vitamina B9) e a biotina (vitamina B7 ou H) que são vitaminas cruciais também o desenvolvimento das plantas (Kumar *et al.*, 2025).

3.3.2. Gênero *Bacillus* na estruturação dos solos

Microrganismos presentes na rizosfera como os do gênero *Bacillus* protegem as plantas de doenças que são transmitidas pelo próprio solo. Induzem resistência sistêmica nas plantas através de compostos antimicrobianos que são produzidos, na qual competem com doenças por espaço e recurso. Também atuam na decomposição dos resíduos orgânicos, incluindo resíduos deixados pelas plantas de cobertura, acelerando e contribuindo com a fertilidade do solo. A inoculação com *Bacillus* pode aumentar a agregação do solo, através de polissacarídeos que atuam na ligação de partículas do solo, formando agregados estáveis. Sendo essencial principalmente para os solos arenosos, aumentar a agregação do solo consequentemente melhora a areação e capacidade de retenção de água, reduz erosão e aumenta resistência do

solo, tornando-se uma alternativa com potencial para melhorar a estrutura e saúde do solo arenoso (Kumar et al., 2025).

3.5.1 *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis*

A espécie *Bacillus megaterium* é usado há mais de 50 anos na indústria, possui alto potencial de sintetização de exoenzimas e produz enzimas raras. Pode ser utilizado também como hospedeiro para clonagens, usado principalmente para produção de proteínas intactas e pode manter uma grande variedade de vetores plasmidiais (Biedendieck, 2007). Além de serem bactérias promotoras de crescimento, fornecendo nitrogênio para as plantas e favorecendo o seu crescimento, contribuindo principalmente na sustentabilidade e na produtividade agrícola (Di Benedetto et al., 2016; Di benedetto et al., 2017).

A utilização da bactéria *Bacillus subtilis* traz benefícios para diversas partes da planta, na semente aumenta a germinação e emergência das plântulas e aumenta a biomassa vegetal e a produção de grãos e frutos. Além disso, é possível que essa bactéria cause uma alteração nas plantas, ao fazer síntese de etileno, principalmente. Hormônio muito importante no crescimento das plantas, influenciando em processos como a senescência de folhas, abortamento de flores, crescimento de raízes, nodulação e outros. Esses processos são fundamentais na mitigação dos efeitos causados pelo estresse abiótico em plantas (Balbontin et al., 2007).

O *Bacillus subtilis* pode ser capaz de sintetizar nitrogênio para a planta, facilitando com a redução da dependência de nitrogênio químico e reduzindo os custos, além de solubilizar fosfato, disponibilizando fósforo para a planta e melhorando seu crescimento (Ibanhes Neto e Fernandes, 2021). É um gênero que apresenta grande resistência a condições ambientais adversas, devido a sua capacidade de desenvolver endósporos que faz com que eles consigam sobreviver por períodos maiores e sob condições ambientais diferentes (Wipat, Harwood, 1999).

3.4 FEIJÃO-COMUM EM SUCESSÃO: EFEITO RESIDUAL

3.4.1 Sensibilidade edafoclimática do feijão-comum *Phaseolus vulgaris*

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) faz parte da família Fabaceae (leguminosa) possui ciclo anual e curto, produz grãos de alto valor nutricional onde 20% do peso dos grãos é proteína, mas também são ricos em carboidratos, minerais e vitaminas. Como característica principal de leguminosas, o feijão possui associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio, capazes de fixar N atmosférico, favorecendo o aumento da disponibilidade de N que em conjunto com o P são os nutrientes limitantes para a produtividade de grãos (Souza *et al.*, 2023).

É uma planta sensível a condições climáticas principalmente relacionados a temperatura e precipitação pluviométrica. Temperaturas acima de 30°C podem ser consideradas prejudiciais ao cultivo do feijão, principalmente no período reprodutivo, causam redução de ciclo, elevação da atividade respiratória, influência no desenvolvimento dos botões florais, redução da assimilação de gás carbônico e principalmente a redução da produtividade de grãos (Didonet; Madriz, 2002).

3.4.2. Efeito residual das plantas de cobertura

O cultivo de plantas de cobertura antecedentes ao feijão é uma alternativa sustentável de melhorar a estrutura de solos arenosos preparando-o para o cultivo do feijão, que é uma cultura sensível as condições edafoclimáticas além de fornecer nitrogênio para a cultura, sendo um nutriente essencial para seu desenvolvimento, principalmente ao utilizar gramíneas, que produzem grande quantidade de biomassa e cobertura vegetal, aumentando quantidade de matéria orgânica e reduzindo as perdas de nitrogênio (Alexandre, 2024). Segundo alguns estudos, as plantas de cobertura têm aumentado o rendimento de grãos do feijão (Pereira et al., 2020; Araújo et al., 2021).

A sucessão de culturas possui um papel crucial na manutenção da saúde do solo e na sustentabilidade dos sistemas agrícolas. O cultivo das plantas de cobertura traz inúmeros benefícios, incluindo, a ciclagem de nutrientes no sistema, elas captam nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio (Pacheco et al., 2017; Teodoro et al., 2018; Carneiro et al.,

2020). E após sua decomposição, esses nutrientes são liberados de volta para o solo, enriquecendo o solo e tornando-os disponíveis para as culturas subsequentes.

Além da ciclagem de nutrientes, essa prática também é fundamental para o controle de pragas e doenças, pois a rotatividade de culturas em uma mesma área dificulta a sobrevivência de patógenos e pragas de determinadas espécies, reduzindo assim o uso de pesticidas e o risco desses organismos prejudicarem as culturas (Alexandre, 2024).

Além disso, as gramíneas, garantem maior proteção do solo e minimizam a incidência de plantas daninhas, através da limitação de passagem de luz que a palhada proporciona, afetando a germinação de outras sementes e dificultando a incidência das plântulas (Alvarenga et al., 2001). Também atuam na macrofauna e biomassa microbiana do solo, que são importantes para diversos processos biológicos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O experimento foi desenvolvido durante o período de novembro de 2023 a setembro de 2024, na área experimental da UNESP, Campus de Dracena – SP, pertencente à região da Nova Alta Paulista, situada aproximadamente a 51° 52' de longitude Oeste de Greenwich e 21° 29' de Latitude Sul com 420 m de altitude (Figura 1).

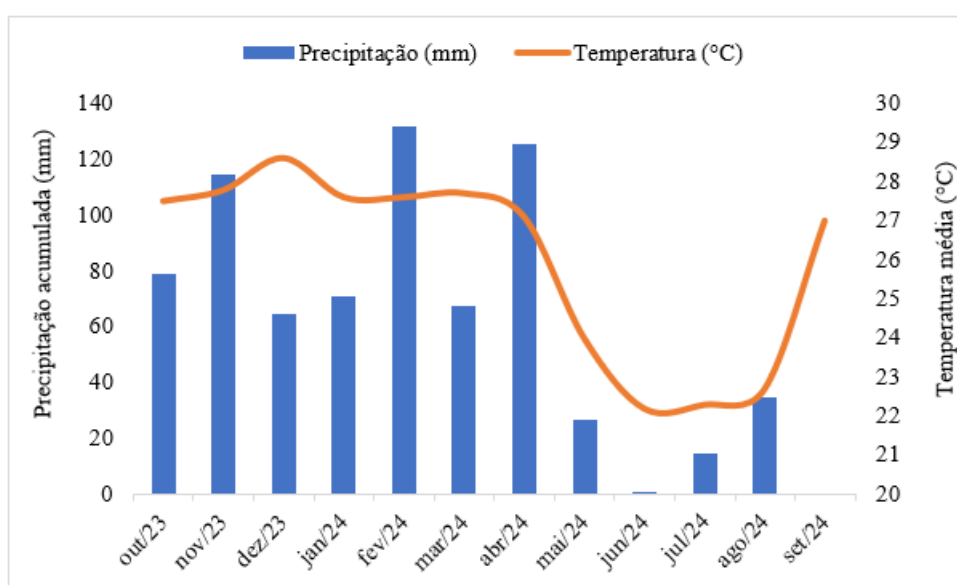
Figura 1 - Foto de satélite da área experimental da UNESP de Dracena/SP.



Fonte: google maps

O solo utilizado foi classificado como Argissolo (Acrisols) Vermelho Amarelo distrófico típico de textura arenosa (Santos *et al.*, 2025). O tipo climático da região é definido como tropical úmido (Aw), caracterizado pelo inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso, segundo Koppen. Possui uma temperatura média anual de 24,0°C, precipitação pluvial média anual de 1.261 mm e umidade relativa do ar média anual de 64,0%. Esses dados climáticos foram obtidos na estação Meteorológica Campbell Scientific CR10X, instalada na UNESP, Campus de Dracena, localizada a 200 m da área experimental (Figura 2).

Figura 2 - Perfil climático mensal do período de nov/2023 a set/2024.



Fonte: próprio autor

4.2 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Foi realizada uma análise química do solo antes da instalação do experimento, sendo coletada uma amostra composta, proveniente de 20 amostras simples deformadas do solo de toda a área experimental, utilizando um trado de rosca, em camadas estratificadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m (Tabela 1). Foi realizado um preparo convencional do solo também antes da implementação do experimento, composto por uma aração profunda e duas operações com grade leve.

Tabela 1 - Caracterização química da área experimental antes da implementação do experimento, 2023.

Profundidade do solo 0,0-0,20m									
P resina (mg/dm ³)	M.O (g/dm ³)	pH (CaCl ₂)	K (mmolc/dm ³)	Ca (mmolc/dm ³)	Mg (mmolc/dm ³)	H+Al (mmolc/dm ³)	Al (mmolc/dm ³)	SB (mmolc/dm ³)	S-SO ₄ (mg/dm ³)
13	11	5.9	1.4	14	7	11	0	22.4	4
CTC (mmolc/dm ³)	V% (%)	Ca/CTC (%)	Mg/CTC (%)	m (%)	B (mg/dm ³)	Cu (mg/dm ³)	Fe (mg/dm ³)	Mn (mg/dm ³)	Zn (mg/dm ³)
33.4	67	42	21	0	0.26	0.4	12	9.3	0.7
Profundidade do solo 0,20-0,40m									
P resina (mg/dm ³)	M.O (g/dm ³)	pH (CaCl ₂)	K (mmolc/dm ³)	Ca (mmolc/dm ³)	Mg (mmolc/dm ³)	H+Al (mmolc/dm ³)	Al (mmolc/dm ³)	SB (mmolc/dm ³)	S-SO ₄ (mg/dm ³)
6	10	5.5	1.2	10	5	12	0	16.2	4
CTC (mmolc/dm ³)	V% (%)	Ca/CTC (%)	Mg/CTC (%)	m (%)	B (mg/dm ³)	Cu (mg/dm ³)	Fe (mg/dm ³)	Mn (mg/dm ³)	Zn (mg/dm ³)
28.2	57	35	18	0	0.21	0.5	12	9.8	0.5

Fonte: Próprio autor

O delineamento experimental utilizado foi o delineamento em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial 3x2, com três repetições. Os tratamentos foram constituídos de três mixes de diferentes arranjos de espécies de culturas de cobertura do solo associado à presença e ausência da inoculação via semente nos mixes de microrganismos solubilizadores de fosfato. O inoculante comercial utilizado foi o BiomaPhos® que contém cepas B119 (*Bacillus megaterium*) e B2084 (*Bacillus subtilis*) e apresentam 2×10^8 células viáveis por grama do produto, utilizando-se a dose de 100 mL ha⁻¹ inoculante.

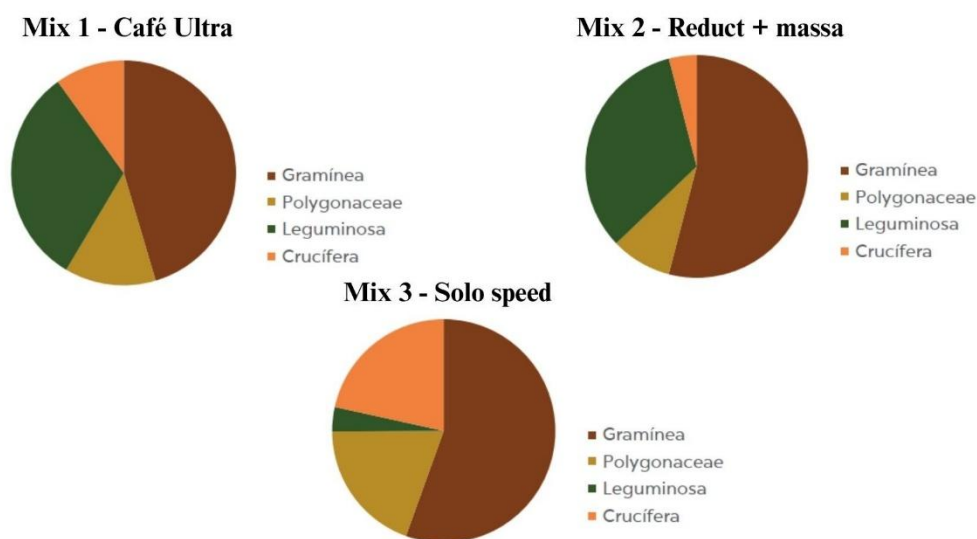
Os três mixes de diferentes arranjos de espécies de culturas de cobertura do solo misturadas comercialmente e utilizadas foram fornecidos pela Renovagro, possuem os seguintes nomes comerciais em parênteses e suas respectivas composições:

Mix 1 (Café ultra): *Crambe* spp., *Crotalaria ochroleuca*, *Eleusine coracana*, *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucum* e *Raphanus sativus*.

Mix 2 (Reduct + massa): *Crambe* spp., *Crotalaria breviflora*, *Crotalaria ochroleuca*, *Eleusine coracana*, *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucu*, e *Urochloa ruzizensis*.

Mix 3 (Solo speed): *Crambe* spp., *Fagopyrum esculentum*, *Pennisetum glaucum*, *Raphanus sativus*, *Sorghum bicolor* (forrageiro) e *Vigna unguiculata*.

Figura 3 - Proporção de famílias dentro dos mixes (plantas/m²).



Fonte: Renovagro

As parcelas foram constituídas por oito linhas de 5 m de comprimento, sendo consideradas como área útil as seis (6) linhas centrais, desprezando-se 0,5 m, em ambas as extremidades de cada linha. Cada parcela experimental foi constituída de 18,00 m², sendo 3,6 m de largura por 5,0 m de comprimento. O espaçamento entrelinhas foi de 0,45 m com distribuição de sementes recomendada para cada mix de espécies de cultura de cobertura do solo, sendo: mix 1 (22,5 kg/ha – 5,1 g de sementes por linha), mix 2 (27,0 kg/ha – 6,0 g de sementes por linha) e mix 3 (31,5 kg/ha – 7,1 g de sementes por linha).

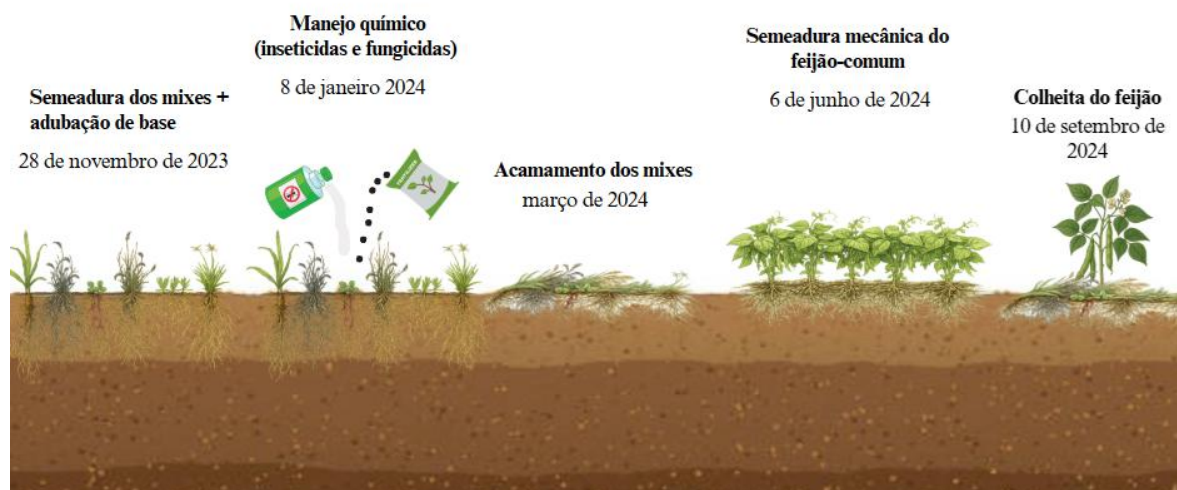
A semeadura dos mixes foi realizada em 28 de novembro de 2023 com emergência em 05 de dezembro de 2023, a adubação de base foi feita com 200kg/ha e recomendação de 08-28-16 (NPK). Em 8 de janeiro de 2023 foi feita a aplicação do inseticida comercial PREMIO® (Clorantraniliprole 200 g/L) dose de com 125 ml/ha e fungicida comercial Triazol (Tebuconazol 430 g/L) com dose de 450 ml/ha. Após 1 mês foi feito o dessecamento da área com Glifosato

(2,5L/ha) e 2,4-D (1,02 L/ha) e o acamamento das plantas realizado através do manejo mecânico com grade niveladora fechada, em março de 2024.

A semeadura mecânica do feijão-comum foi realizada dia 6 de junho de 2024 com emergência em 13 de junho de 2024. A cultivar escolhida foi IPR Sabiá, recomendada e adaptada para a região, com hábito de crescimento indeterminado tipo II. As sementes foram tratadas previamente com produto comercial Standak[®] Top que contém três princípios ativos: Fipronil (250 g/L - inseticida), Tiofanato-metílico (225 g/L - fungicida) e Piraclostrobina (25 g/L - fungicida) na dose de 2,0 ml/kg de semente, seguindo a recomendação do fabricante. Após o tratamento, foi realizada a inoculação das sementes com *Rhizobium tropici* (SEMIA 4077) com inoculante turfoso na dose de 2,5 ml para 1 kg de sementes com garantia de 2×10^9 UFC g⁻¹. Para adesão das bactérias foi acrescentada uma solução açucarada a 10% nas sementes.

A densidade de sementes do feijão-comum foi de 14,5 sementes/m linear. A adubação de base foi 157 kg/ha com recomendação de 08-28-16. O manejo de plantas daninhas foi realizado 6 de junho de 2024 via aplicação de herbicidas pré emergente Prowl[®] H2O (Pendimetalina 455 g/L) com dose de 2 L/ha. E a aplicação do inseticida comercial Metomil 215 SL Nortox (Metomil 215 g/L) na dose de 1,0 L/ha e fungicida comercial Opera[®] com princípios ativos: Piraclostrobina (130 g/L) e Epoxiconazol (50 g/L) e dose de 0,5 L/ha no dia 12 de julho de 2024. Foi realizado adubação de cobertura divididas em 2 aplicações, sendo a primeira 2 de julho de 2024 e a segunda 16 de julho de 2024. E a colheita do feijão-comum foi realizada dia 10 de setembro de 2024.

Figura 4 - Imagem ilustrativa das etapas da condução do experimento (nov/2023 – set/2024).



Fonte: próprio autor.

4.3 AVALIAÇÕES

Foram avaliados atributos físicos e químicos do solo além dos componentes de produção dos mixes de plantas de cobertura e do feijão-comum. Os componentes dos mixes de plantas de cobertura foram coletados no dia 25 de março de 2024 e o feijão-comum 11 de setembro de 2024. As amostras para análises físicas e químicas foram coletadas dia 17 de setembro de 2024 e levadas para análise em laboratório.

Para as análises de solo foram coletadas amostras indeformadas e deformadas, em três camadas de solo: 0,00–0,05; 0,05–0,10 e de 0,10–0,20 m.

As avaliações realizadas foram:

Porosidade do solo (PT), macroporosidade (MA) e microporosidade (MI) e Densidade do solo (DS): A porosidade total foi determinada pela saturação do solo (volume de poros totais do solo ocupado pela água), a macroporosidade pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 6,0 kPa e a microporosidade calculadas por diferença entre a porosidade total e a macroporosidade (Teixeira et al., 2017). A obtenção da densidade do solo envolve duas etapas: massa e volume da amostra, e foi determinada pelo método do anel volumétrico (Teixeira et al., 2017).

Estabilidade de agregados (via úmida): A distribuição e estabilidade de agregados em água foi analisada pela metodologia de Angers e Mehuys (2008).

Infiltração de água no solo: Foram realizadas 3 avaliações em cada parcela experimental utilizando o mini infiltrômetro de disco (Zhang, 1997).

Carbono orgânico (CO), $\delta^{13}\text{C}$ e fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS): O fracionamento físico da matéria orgânica foi realizado de acordo com a metodologia de Cambardella e Elliot (1992) por oxidação da matéria orgânica via úmida. O teor de carbono orgânico do solo foi determinado pela metodologia de Yeomans e Bremner (1988). O $\delta^{13}\text{C}$ foi determinado por Espectrometria de Massa de Razão Isotópica (IRMS), no laboratório de isótopos do CENA/ESALQ.

Estoque de carbono orgânico (ECO): O estoque de carbono orgânico (ECO) na camada estudada (t ha^{-1}), foi determinado pela seguinte fórmula:

$$ECO = (COT * DS * E) / 10$$

Onde, COT = teor de carbono na camada (g kg⁻¹); Ds = densidade aparente do solo da camada estudada (g cm⁻³); E = espessura da camada estudada (cm).

Matéria seca da parte aérea (MPSA): Em cada parcela (unidade experimental) foram retiradas subamostras obtidas com quadrantes de 0,25 m² (0,5 × 0,5 m) posicionados aleatoriamente/estratificados dentro da parcela. O material da parte aérea foi cortado rente ao solo e acondicionado. As subamostras (ou amostras totais) foram secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C até massa constante (diferença entre duas pesagens consecutivas < 1%).

Produtividade de grãos do feijoeiro: Os grãos colhidos foram pesados. A umidade desses grãos foi medida e corrigida para 13% e para determinar a produtividade foi feito um cálculo dividindo o peso dos grãos (já corrigidos pela umidade) pela área total.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram submetidos ao teste F da análise de variância e constatada a interação significativa entre as fontes de variação, foi realizado o desdobramento para o fatorial 3x2, comparando as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de significância, de acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002). Para essa análise estatística foi utilizado o software SISVAR desenvolvido por Ferreira (2011).

5. RESULTADOS

5.1 CARBONO NO SOLO

Na camada de 0,0 - 0,05 m houve interação significativa entre a inoculação (com vs. sem) e os mixes (p < 0.05) para carbono orgânico do solo (COS). Os mixes com inoculação proporcionaram maior COS do que os tratamentos sem inoculação. O mix 2 com inoculação foi o tratamento que proporcionou maior quantidade de COS na camada superficial, diferindo estatisticamente dos demais, com um incremento de 87,27% em relação ao mix 2 sem inoculação que proporcionou menor quantidade de COS (Tabela 2).

Também se observou interação significativa entre a inoculação (com vs. sem) e os mixes (p < 0.05) para matéria orgânica do solo (MOS) na camada de 0,0 – 0,05 m. Os mixes com inoculação proporcionaram maior quantidade de MOS em relação aos tratamentos sem

inoculação. O mesmo tratamento que proporcionou maior quantidade de COS também proporcionou maior quantidade de MOS, com um incremento de cerca de 87,32% a mais em relação ao mix 2 sem inoculação (menor quantidade), o tratamento de mix 2 com inoculação foi o que diferiu estatisticamente dos demais (Tabela 2).

Na camada de 0,05 - 0,10 m não houve interação significativa entre a inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p > 0.05$) para o COS e MOS. Porém houve efeito isolado dos mixes, onde o mix 1 proporcionou maior quantidade de COS e MOS diferindo estatisticamente dos demais tratamentos, independente da presença e ausência da inoculação. Com um incremento de 49,04% de COS e 49,23% de MOS em relação ao mix 3 – menor quantidade (Tabela 2).

Na camada mais profunda de 0,10 – 0,20 m houve interação significativa entre a inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p < 0.05$) para o COS e MOS. O mix 1 e 3 com inoculação proporcionaram maiores quantidade de COS e MOS comparado aos tratamentos sem inoculação (Tabela 2).

Tabela 2 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) na quantidade de carbono orgânico e matéria orgânica do solo.

Camada de solo 0 – 0,05 m			
Mixes	Inoculação	COS (g/kg)	MOS (g/kg)
Mix 1	Com	11,72 Ab	13,76 Ab
	Sem	10,39 Aa	12,19 Ba
Mix 2	Com	16,48 Aa	19,35 Aa
	Sem	8,80 Bb	10,33 Bb
Mix 3	Com	12,07 Ab	14,17 Ab
	Sem	9,62 Bab	11,30 Bab
F mix*inoc		60,492*	60,724*
Camada de solo 0,05 – 0,10 m			
Mix 1	-	13,19 a	15,49 a
Mix 2	-	10,46 b	12,28 b
Mix 3	-	8,85 c	10,38 c
Média de Inoc.	Com/Sem	10,76 A/10,91 A	12,63 A/12,80 A
F mix*inoc		60,492 ^{ns}	60,724 ^{ns}
Camada de solo 0,10 – 0,20 m			
Mix 1	Com	13,29 Aa	15,50 Aa
	Sem	8,78 Ba	10,32 Ba
Mix 2	Com	9,52 Ab	11,17 Ab
	Sem	9,60 Aa	11,27 Aa
Mix 3	Com	12,01 Aa	14,11 Aa
	Sem	9,65 Ba	11,33 Ba
F mix*inoc		15,048*	15,063*

Nota: médias seguidas de mesma letra minúscula não se diferenciam entre os mixes e médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferenciam na inoculação pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor

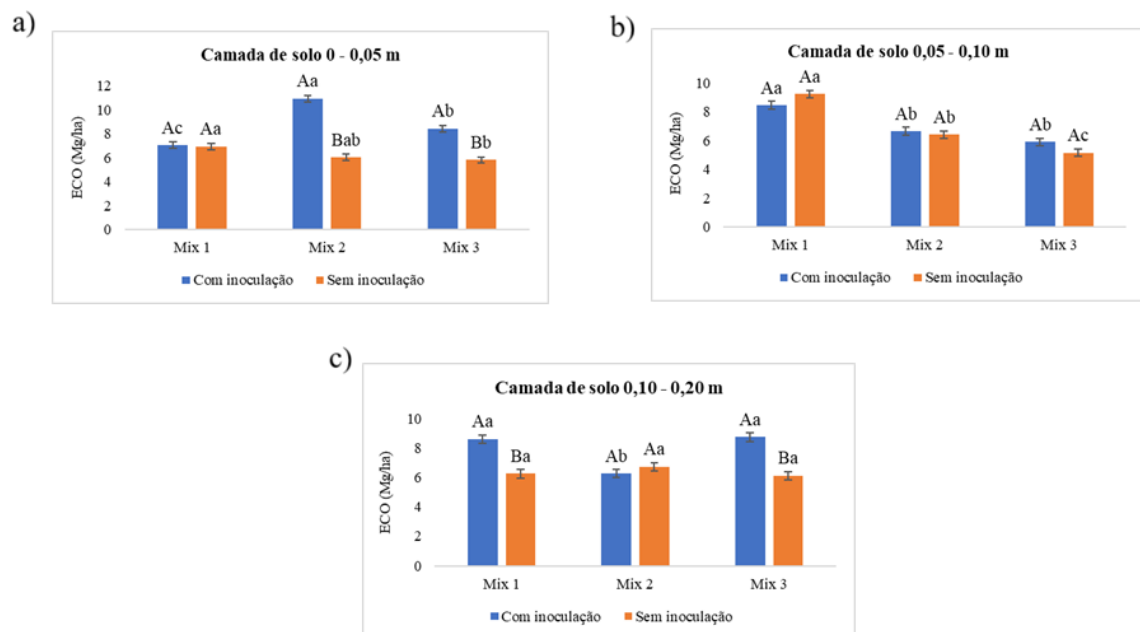
Na figura 5 é possível observar que para o estoque de carbono (ECO) houve interação estatística entre a inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p < 0.05$) em todas as camadas analisadas (0 – 0,05; 0,05 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m).

Na camada superficial (0 – 0,05 m) os tratamentos com inoculação proporcionaram os maiores estoques de carbono em relação aos tratamentos sem inoculação. E o mix 2 com inoculação foi o tratamento que proporcionou maior estoque de carbono diferindo estatisticamente dos demais, assim como nos atributos de COS e MOS (Tabela 5a)

Na camada de 0,05 – 0,10 m o mix 1 independente da inoculação proporcionou os maiores estoques de carbono diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Não houve diferença estatística em relação a inoculação em nenhum dos tratamentos (Tabela 5b)

Na camada mais profunda (0,10 – 0,20 m) assim como nos atributos de COS e MOS, os tratamentos de mix 1 e mix 3 com inoculação foram os tratamentos que proporcionaram os maiores estoques de carbono diferindo estatisticamente dos demais (Tabela 5c)

Figura 5 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) no estoque de carbono orgânico do solo (ECO).



Nota: barras seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem dentro dos mixes e barras seguidas de mesma letra minúscula não se diferem na inoculação pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor

Na tabela 3 os resultados não foram submetidos a análise estatística pela ausência de repetição das amostras. Porém os dados da análise de $\delta^{13}\text{C}$ evidenciam diferenças visíveis entre os mixes de plantas de cobertura, associadas ao metabolismo das plantas (C_3 vs. C_4) e a influência da inoculação no sinal isotópico através do cálculo de variância percentual.

O mix 1 com inoculação apresentou valores intermediários de $\delta^{13}\text{C}$ em todas as profundidades, variando aproximadamente entre $-18,24$ e $-17,82\text{‰}$, tornando-se o tratamento que proporcionou os menores valores negativos, indicando um maior enriquecimento de ^{13}C e sugerindo maior incorporação da matéria orgânica através de plantas de metabolismo C_4 . A presença da inoculação no mix 1 apresentou uma variação positiva em média de $5,31\%$ em todas as camadas, contribuindo com o maior enriquecimento de ^{13}C (Tabela 3).

A presença da inoculação também proporcionou variação percentual positiva para o mix 1 e 2 na camada superficial ($0 - 0,05$ m), isso sugere maior incorporação recente de carbono derivado da biomassa vegetal, possivelmente associada ao estímulo microbiano à decomposição e ciclagem do C. Apresentou variação percentual positiva também para mix 1 e 3 na camada subsuperficial ($0,05 - 0,10$ m) e para o mix 1 e 2 novamente na camada mais profunda ($0,10 - 0,20$ m) (Tabela 3).

O mix 3 apresentou maior amplitude de valores de $\delta^{13}\text{C}$, variando entre $-18,64$ a $-20,34\text{‰}$, com destaque na camada mais profunda ($0,10 - 0,20$ m) onde apresentou o valor mais negativo observado ($-20,34\text{‰}$) entre todas as camadas e uma variação percentual negativa de $6,26\%$ com a presença da inoculação, indicando empobrecimento do ^{13}C no solo. Esse valor sugere maior contribuição de carbono derivado de plantas de metabolismo C_3 ou maior incorporação de carbono microbiano, que tende a apresentar fracionamento isotópico adicional durante os processos de decomposição e estabilização da matéria orgânica. Isso pode indicar uma dinâmica mais intensa de transformação do carbono, com possível maior participação de compostos mais lábeis (Tabela 3).

Tabela 3 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) na análise de $\delta^{13}\text{C}$, sem estatística.

Camada (m)	Mixes	Com inoculação	Sem inoculação	Δ (Variação %)
0 – 0,05 m	Mix 1	-18,24	-19,29	+5,44%
	Mix 2	-18,40	-19,23	+4,30%
	Mix 3	-18,73	-18,64	-0,48%
0,05 – 0,10 m	Mix 1	-18,46	-19,48	+5,23%
	Mix 2	-19,49	-18,54	-5,12%
	Mix 3	-19,49	-19,62	+0,66%
0,10 – 0,20 m	Mix 1	-17,82	-18,81	+5,26%
	Mix 2	-18,79	-18,98	+1,00%
	Mix 3	-20,34	-19,14	-6,26%

Fonte: Próprio autor.

5.2 MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA DOS MIXES E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO

Para a MSPA na Tabela 4 não houve interação significativa entre a inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p > 0.05$), porém houve efeito isolado da inoculação, onde os mixes sem inoculação apresentaram maior quantidade de MSPA.

Para a produtividade de grãos do feijoeiro também não houve diferença significativa entre a inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p > 0.05$) mas teve efeito isolado dos mixes e da inoculação. O mix 2 foi o que proporcionou maior produtividade de grãos do feijoeiro diferindo estatisticamente dos demais e os tratamentos com inoculação proporcionaram maior produtividade de grãos do feijoeiro também (Tabela 4).

Tabela 4 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs na matéria seca da parte aérea (MSPA) e produtividade de grãos do feijão.

Tratamentos	MSPA mixes (kg/ha)	PG do feijão (kg/ha)
Mix de Plantas		
Mix 1	5.446,40 a	1.569,45 b
Mix 2	4.692,86 a	1.767,71 a
Mix 3	4.355,48 a	1.725,20 ab
DMS	1.101,96	189,63
Inoculação		
Com	4.138,84 b	1.818,25 a
Sem	5.524,32 a	1.556,65 b
DMS	730,90	125,77
F inoc*trat	2.542 ^{ns}	1.072 ^{ns}
CV (%)	14.40	7.10

Nota: médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor.

5.3 ESTABILIDADE DE AGREGADOS DO SOLO

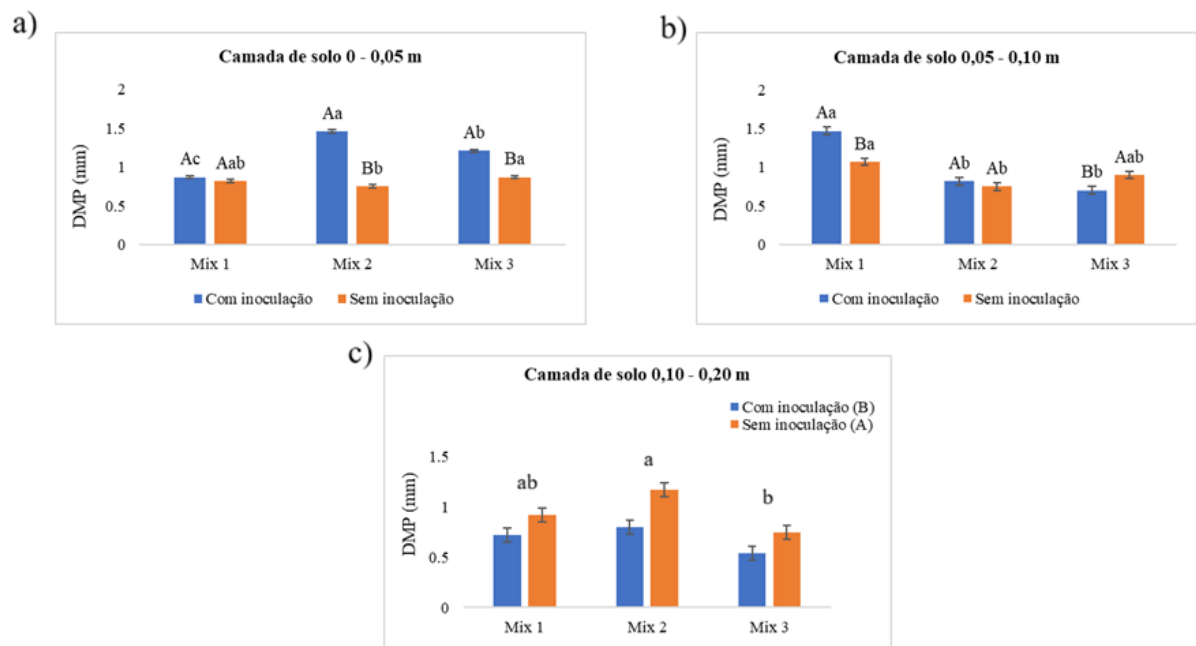
Na figura 6 podemos observar os dados do diâmetro médio ponderado (DMP), na camada superficial (figura 6a) houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p < 0.05$). A presença da inoculação proporcionou maior DMP no mix 2 e 3 em relação a ausência, com aumento de 94,66% e 39,08% respectivamente. O mix 2 com inoculação proporcionou o maior valor de DMP diferindo estatisticamente dos demais tratamentos na camada superficial.

Na Figura 6b mostra que também houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p < 0.05$) na camada de 0,05 – 0,10 m. O mix 1 independente da inoculação

foi o melhor mix em relação aos outros, proporcionando os maiores valores de DMP. A presença de inoculação no mix 1 proporcionou o maior valor de DMP em relação aos outros tratamentos, com um aumento de aproximadamente 110% relacionado ao mix 3 com inoculação que proporcionou o menor valor de DMP.

Na camada mais profunda (Figura 6c) não houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p > 0.05$), porém houve efeito isolado dos mixes e da inoculação, onde o mix 2 diferiu estatisticamente dos demais mixes proporcionando maior DMP e os tratamentos sem inoculação proporcionaram maiores valores de DMP em relação a presença da inoculação.

Figura 6 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,20 m) no atributo de DMP.



Nota: barras seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem dentro dos mixes em relação a inoculação e barras seguidas de mesma letra minúscula não se diferem na inoculação em relação aos mixes pelo teste de tukey a 5% de probabilidade, para fig a e b. barras seguidas de mesma letra minúscula não diferem os mixes entre si e letras maiúsculas iguais não diferem a inoculação entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade, para fig c.

Fonte: Próprio autor.

Para os atributos de macro e micro agregados observou-se interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p < 0.05$) em todas as camadas analisadas (Tabela 5).

Na camada superficial (0 – 0,05 m) a presença de inoculação proporcionou maior porcentagem de macro agregados no mix 2 e 3 com um aumento de aproximadamente 29,13% e 44,18 respectivamente, quando comparado a ausência da inoculação, tornando-se os tratamentos que proporcionaram maiores porcentagens de macro agregados na camada superficial diferindo estatisticamente dos demais (Tabela X). Os mesmos tratamentos proporcionaram as menores porcentagens de micro agregados, onde a presença da inoculação reduziu a porcentagem de micro agregados respectivamente no mix 2 e 3 com cerca de 7,63% e 9,80% em relação a ausência da inoculação. Mix 2 e mix 3 com inoculação proporcionaram a maior estabilidade de agregados na camada superficial do solo (Tabela 5).

Na camada de 0,05 – 0,10 m do solo o mix 1 com inoculação proporcionou a maior porcentagem de macro agregados no solo, com um aumento de aproximadamente 145% quando comparado ao tratamento que proporcionou a menor porcentagem (mix 3 com inoculação). O mesmo tratamento proporcionou a menor porcentagem de micro agregados na mesma camada, com uma redução de aproximadamente 19,62% quando comparado ao tratamento que proporcionou a maior porcentagem de micro agregados (mix 3 com inoculação) (Tabela 5). Portanto, mix 1 com inoculação proporcionou maior estabilidade de agregados na camada subsuperficial.

Na camada mais profunda (0,10 – 0,20 m) diferentemente das outras camadas, a ausência da inoculação proporcionou maior porcentagem de macro agregados no solo no mix 1 e 2, com um aumento de 43,89% e 76,78% respectivamente em relação a presença da inoculação, tornando-se os tratamentos que proporcionaram as maiores porcentagens de macro agregados diferindo estatisticamente dos demais. E ainda, proporcionando as menores porcentagens de micro agregados, diferindo dos demais tratamentos. Portanto, mix 1 e 2 sem inoculação proporcionaram maior estabilidade de agregados do solo na camada mais profunda (Tabela 5).

Tabela 5 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) nos atributos de estabilidade de agregados do solo (macro e microagregados).

Camada de solo 0 – 0,05 m					
Mix de plantas	Macro agregados (%)			Micro agregados (%)	
	Com inoculação	Sem	Inoculação	Com Inoculação	Sem Inoculação
Mix 1	16,80Bb		21,19Aa	83,19Aa	78,80Bb
Mix 2	26,37Aa		20,42Ba	73,50Bb	79,57Ab
Mix 3	26,14Aa		18,13Bb	73,85Bb	81,87Aa
F inoc*trat	165,925*			157,673*	
Camada de solo 0,05 – 0,10 m					
Mix de plantas	Macro agregados (%)			Micro agregados (%)	
	Com inoculação	Sem	Inoculação	Com Inoculação	Sem Inoculação
Mix 1	29,14Aa		24,86Ba	70,85Bc	75,13Ac
Mix 2	25,00Ab		16,26Bc	75,00Bb	83,74Aa
Mix 3	11,86Bc		20,06Ab	88,14Aa	79,95Bb
F inoc*trat	74,993*			74,729*	
Camada de solo 0,10 – 0,20 m					
Mix de plantas	Macro agregados (%)			Micro agregados (%)	
	Com inoculação	Sem	Inoculação	Com Inoculação	Sem Inoculação
Mix 1	11,53Ba		20,55Aa	88,46Aa	79,45Bb
Mix 2	12,02Ba		21,25Aa	87,97Aa	78,74Bb
Mix 3	11,94Aa		5,76Bb	88,05Ba	94,30Aa
F inoc*trat	74,666*			76,014*	

Nota: médias seguidas de mesma letra minúscula não se diferenciam na coluna e médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem na linha pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor.

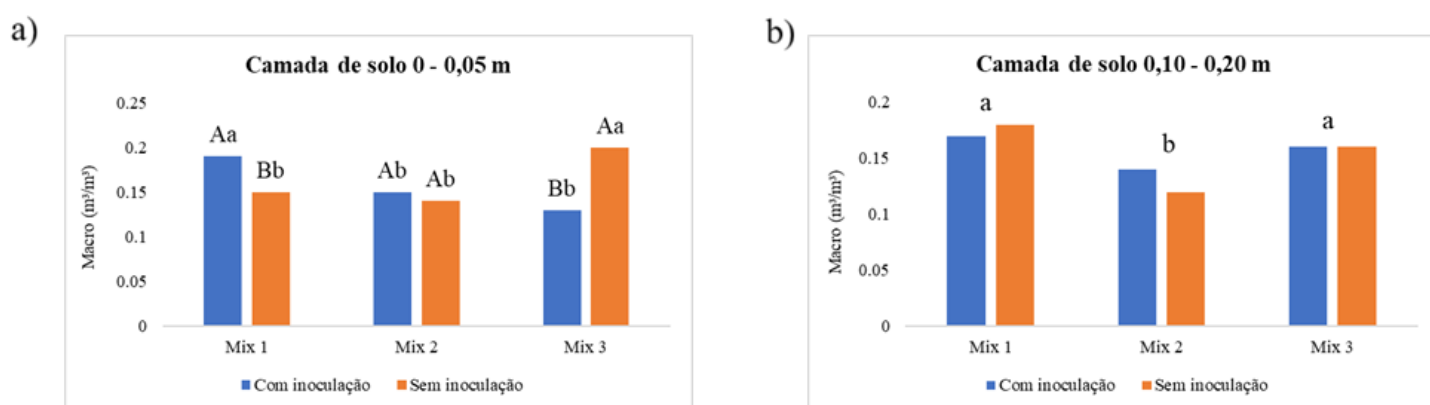
5.4 POROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO

Para o atributo de macroporosidade do solo, houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p < 0.05$) na camada superficial de 0 – 0,05 m. É possível observar no gráfico que o mix 1 com inoculação e o mix 3 sem inoculação foram os tratamentos que proporcionaram maior macroporosidade diferindo estatisticamente dos demais (Figura 7a).

Não houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p > 0.05$) na camada de 0,05 – 0,10 m e nem efeito isolado de nenhum dos fatores (inoculação e mixes).

Na camada mais profunda (0,10 – 0,20 m) não houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p > 0.05$) porém houve efeito isolado dos mixes, onde os mixes 1 e 3 proporcionaram maior macroporosidade em relação ao mix 2 (Figura 7b)

Figura 7 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs na camada de 0 – 0,05 m e 0,10 – 0,20 m no atributo de macroporosidade.



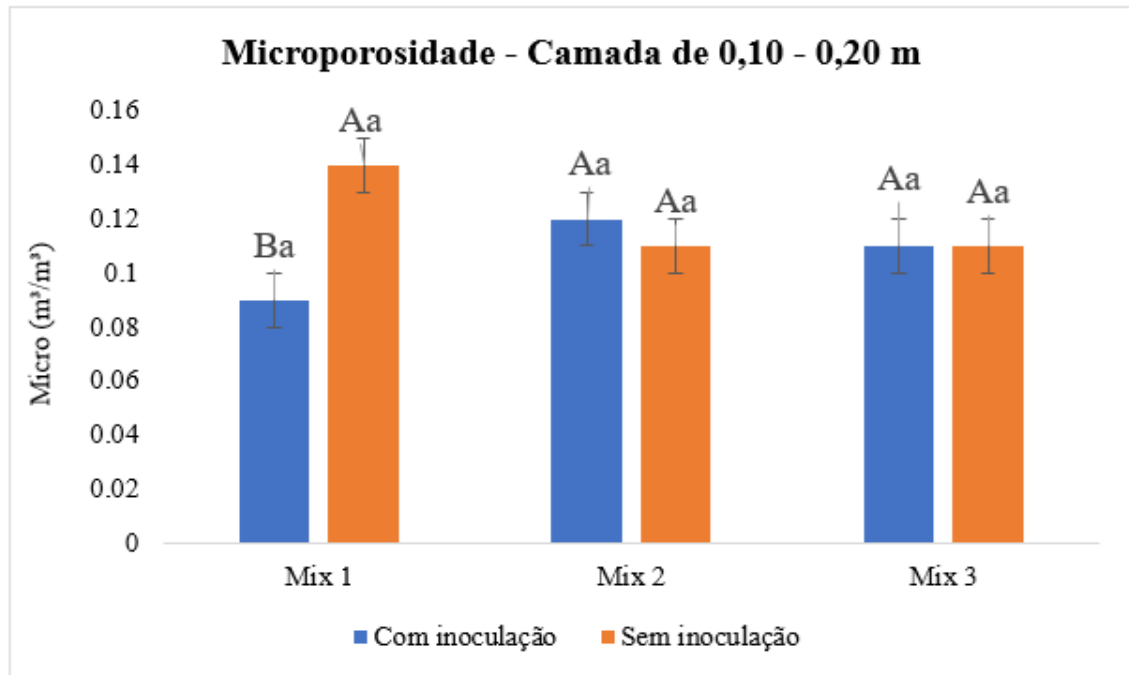
Nota: barras seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem dentro dos mixes em relação a inoculação e barras seguidas de mesma letra minúscula não se diferem na inoculação em relação aos mixes pelo teste de tukey a 5% de probabilidade, para fig a. e barras seguidas de mesma letra minúscula não diferem os mixes entre si teste de tukey a 5% de probabilidade, para fig b.

Fonte: Próprio autor.

Para a microporosidade não houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p > 0.05$) na camada superficial (0 – 0,05 m) e na camada subsuperficial (0,05 – 0,10 m), houve interação apenas na camada de 0,10 – 0,20 m ($p < 0.05$), onde é possível observar a ausência da inoculação no mix 1 proporcionou maior microporosidade com um aumento de aproximadamente 55,55% em relação a presença da inoculação e diferindo

estatisticamente entre eles, tornando-se o tratamento que proporcionou a maior microporosidade na camada de 0,10 – 0,20 m (Figura 8).

Figura 8 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs na camada 0,10 – 0,20 m no atributo de macroporosidade.



Nota: barras seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem dentro dos mixes em relação a inoculação e barras seguidas de mesma letra minúscula não se diferem na inoculação em relação aos mixes pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 6 em relação aos atributos de porosidade total do solo (PTS) e densidade do solo (DS) houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p < 0.05$) para ambos atributos em todas as camadas analisadas.

Na camada superficial (0 – 0,05 m) o mix 1 com inoculação e o mix 3 sem inoculação foram os tratamentos que proporcionaram as maiores PTS diferindo estatisticamente dos demais. E consequentemente os mesmos tratamentos que proporcionaram as menores DS, diferindo estatisticamente dos demais (Tabela 6).

Na camada de 0,05 – 0,10 m o mix 1 com inoculação e o mix 3 sem inoculação novamente foram os tratamentos que proporcionaram as maiores PTS diferindo estatisticamente dos demais, com um aumento de 19,23% em relação ao tratamento que proporcionou a menor PTS (mix 1 sem inoculação). Porém para DS, o mix 2 e 3 sem inoculação foram os tratamentos que proporcionaram as menores DS, diferindo estatisticamente dos demais (Tabela 6).

Na camada mais profunda (0,10 – 0,20 m) o único tratamento que diferiu estatisticamente dos demais, foi o mix 3 com inoculação que proporcionou menor PTS em relação aos demais, com uma diferença de $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Em relação a DS, o mix 1 com inoculação e o mix 3 sem inoculação foram os tratamentos que diferiram dos demais tratamentos e proporcionaram menores DS (Tabela 6).

Tabela 6 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs nas três camadas de solo analisadas (0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10- 0,20 m) nos atributos de porosidade total do solo (PTS) e densidade do solo (DS).

Camada de solo 0 – 0,05 m				
Mix de plantas	PTS (m³/m³)		DS (Mg/m³)	
	Com inoculação	Sem Inoculação	Com Inoculação	Sem Inoculação
Mix 1	0,31Aa	0,28Aab	1,20Bb	1,33Aab
Mix 2	0,27Ab	0,25Ab	1,32Aa	1,37Aa
Mix 3	0,26Bb	0,31Aa	1,39Aa	1,21Bc
F inoc*trat	8,441*		16,053*	
Camada de solo 0,05 – 0,10 m				
Mix de plantas	PTS (m³/m³)		DS (Mg/m³)	
	Com inoculação	Sem Inoculação	Com Inoculação	Sem Inoculação
Mix 1	0,31Aa	0,26Bb	1,30Ba	1,38Aa
Mix 2	0,28Aab	0,27Ab	1,30Aa	1,19Bb
Mix 3	0,27Bb	0,31Aa	1,30Aa	1,19Bb
F inoc*trat	9,937*		18,695*	
Camada de solo 0,10 – 0,20 m				
Mix de plantas	PTS (m³/m³)		DS (Mg/m³)	
	Com inoculação	Sem Inoculação	Com Inoculação	Sem Inoculação
Mix 1	0,26Aa	0,26Aa	1,29Bb	1,42Aa
Mix 2	0,26Aa	0,23Ba	1,31Bb	1,40Aa
Mix 3	0,22Bb	0,26Aa	1,45Aa	1,27Bb
F inoc*trat	6,464*		16,164*	

Nota: médias seguidas de mesma letra minúscula não se diferenciam na coluna e médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem na linha pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor.

Não houve interação significativa entre inoculação (com vs. sem) e os mixes ($p > 0.05$), porém houve efeito isolado dos mixes e da inoculação. É possível observar que o mix 2 e 3 proporcionaram as maiores taxas de infiltração de água no solo, diferindo estatisticamente do mix 1. E a ausência da inoculação proporcionou maior taxa de infiltração de água no solo em relação a presença da inoculação, com um aumento de 40,19% (Tabela 7).

Tabela 7 - Influência dos três tipos de mixes utilizadas com a presença e ausência de inoculação de MSPs na taxa de infiltração de água no solo.

Taxa de infiltração de água no solo (cm/h)	
Mix de Plantas	Médias
Mix 1	109.95 b
Mix 2	134.60 a
Mix 3	141.71 a
DMS	16.63
Inoculação	
Com	107.21 b
Sem	150.30 a
DMS	11.28
F inoc*trat	0,302 ^{ns}
CV (%)	16.00

Nota: médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não se diferenciam pelo teste de tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Próprio autor.

6. DISCUSSÃO

Na camada superficial (0,0 – 0,05 m) o mix 2 com inoculação foi o tratamento que proporcionou maiores quantidades de CO₂, M.O.S e ECO. O mix 2 é o tratamento que possui maior concentração de gramíneas em sua composição, isso possibilita maior produção de

biomassa e cobertura vegetal, proporcionando consequentemente maior quantidade de matéria orgânica e carbono orgânico para o solo. Na camada subsuperficial (0,05 – 0,10 m) o mix 1 com e sem inoculação foram os tratamentos que proporcionaram os maiores valores de carbono orgânico, matéria orgânica e estoque de carbono orgânico do solo. O mix 1 com inoculação também proporcionou maiores valores desses atributos na camada mais profunda (0,10 – 0,20 m) acompanhado do tratamento com o mix 3 com inoculação, ambos diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Todos os melhores tratamentos foram com a presença da inoculação dos microrganismos solubilizadores de fosfato (PSB), isso pode ser explicado pela influência indireta deles, pois o aumento de fósforo lábil no solo favorece o crescimento das raízes, bem como a biomassa produzida pelas plantas e liberam compostos que possuem carbono em sua composição.

O tratamento do mix 1 com inoculação foi o que proporcionou os menores valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ em todas as profundidades, valores que significam maior enriquecimento de ^{13}C com a inoculação de microrganismos no solo. Isso pode ser explicado pela atividade microbiana, onde utilizam preferencialmente o ^{12}C para respiração e retém o ^{13}C no solo principalmente nas camadas mais superficiais, e em profundidade pode estar relacionado com a incorporação do carbono na biomassa e necromassa microbiana (Wang *et al.*, 2021). Além do mais, é possível observar que o menor valor negativo foi na camada mais profunda (0,10 – 0,20 m) devido ao impacto da biomassa microbiana em profundidade e não somente da incorporação do carbono pelas plantas de cobertura (Hicks Prie *et al.*, 2018).

A assinatura isotópica do carbono orgânico do solo é muito influenciada também pelo tipo de vegetação que podem modificar a assinatura ao longo do tempo e nos perfis de solo (Basile-Doelsch *et al.*, 2009; Trouxe *et al.*, 1994; Pessenda *et al.*, 2010). A via fotossintética das plantas são fatores importantes nessas modificações, plantas C3 levam assinaturas de cerca de $\delta^{13}\text{C}$ entre -20,00‰ e -37,00‰ enquanto as plantas C4 apresentam $\delta^{13}\text{C}$ entre -0,9‰ e -17,00‰ (O’Leary 1988; Boutton *et al.* 1998; Kohn 2010). Ou seja, as plantas C3 tendem a apresentarem valores mais negativos do que as plantas C4, nesse caso, os resultados apresentados na Tabela 3 não estão de acordo, pois a via fotossintética das plantas presentes nos mixes não foi o suficiente para interpretar os resultados, visto que o mix 1 que apresentou menos valores de $\delta^{13}\text{C}$ possui mesmo número de espécies com metabolismo C3 comparado aos outros mixes.

Os tratamentos sem inoculação foram os tratamentos que apresentaram maior quantidade de matéria seca da parte aérea (biomassa) das plantas de cobertura fornecendo maior cobertura vegetal para o solo. A redução na matéria seca com os tratamentos inoculados com MSPs embora possa ser contrário do que se espera, corroboram com estudos que indicam um trade-off energético, onde a planta redireciona fotoassimilados para a rizosfera, sustentando a atividade dos MSPs e priorizando a estrutura física do solo via exsudação e desenvolvimento radicular ao invés de produção e crescimento aéreo (Tang e Riley, 2023).

Apesar de não diferir estatisticamente dos demais tratamentos, o mix 2 sem inoculação foi o que apresentou maior quantidade de MSPA isso pode ser devido ao maior número de espécies da família das gramíneas em sua composição. O mix 2 juntamente com o mix 1 também foram os tratamentos que proporcionaram maior quantidade de carbono orgânico, matéria seca e estoque de carbono. Além disso, são os dois mixes que possui a maior proporção de leguminosas em suas composições quando comparado ao mix 3. As leguminosas podem promover a estabilidade e proteção do carbono, além de fornecerem nitrogênio para os microrganismos, que fazem a sintetização da matéria orgânica do solo (Nishigaki *et al.*, 2021; Yao *et al.*, 2019).

Em relação a produtividade de grãos do feijão, apenas os tratamentos com mix 1 e mix 3 sem inoculação foram os que proporcionaram menor produtividade de grãos em relação aos outros tratamentos. Ou seja, todos os tratamentos com inoculação proporcionaram melhor produtividade de grãos do feijão. Resultados que corroboram com os resultados do estudo feito por Souza *et al.* (2023) em que a inoculação com bactérias solubilizadores de fosfato apresentou influencia no maior rendimento de grãos do feijão comum.

O desejado para uma boa estabilidade de agregados é uma porcentagem maior de macroagregados (>2mm) sendo incompatível com os resultados observados nesse experimento, onde os microagregados se apresentam com mais de 70% em todos os tratamentos, mas também característico pela textura arenosa do solo analisado.

O tratamento que proporcionou o maior DMP e maior taxa de macro agregados na camada superficial (0,0 – 0,05 m) foi o mix 2 com inoculação, sendo 1,46 mm e 26,37% respectivamente. Enquanto que na camada subsuperficial o mix 1 com inoculação foi o tratamento que proporcionou maior DMP e maior porcentagem de macro agregados, sendo respectivamente 1,47 mm e 29,14%. E na camada mais profunda, os tratamentos que proporcionaram maior DMP e maior porcentagem de macro agregados foram o mix 1 e mix 2

sem inoculação. Apesar desses tratamentos proporcionarem maior porcentagem de macro agregados em relação aos outros tratamentos, nenhum deles fizeram chegar ao equilíbrio desejado entre macro e micro agregados.

O destaque dos tratamentos com o mix 2 no aumento dos macro agregados e na maior estabilidade de agregados na camada superficial (0,0 – 0,05 m) e principalmente na camada mais profunda do solo (0,10 – 0,20 m), pode ser explicado por ser o mix que possui o maior número de gramíneas em sua composição, o sistema radicular das gramíneas se apresentam de forma mais profunda e agressiva em relação as outras famílias, além de liberarem compostos orgânicos pelas suas raízes que auxiliam na agregação das partículas (Santos *et al.* 2012). Resultados que corroboram com um estudo feito por Silva *et al.* (2024) onde o tratamento com braquiária foi o que apresentou a maior estabilidade de agregados, sendo essa espécie presente apenas no mix 2. E também com o estudo feito por Loss *et al.* (2011) onde concluíram que o uso da braquiária por meio do sistema radicular favoreceu a agregação do solo, resultando em maiores índices de DMP. Além disso, o fato de as gramíneas possuírem uma relação C/N alta com uma decomposição lenta e maior período de tempo de cobertura vegetal no solo (Costa *et al.*, 2015) pode aumentar significativamente a estabilidade de agregados. Explicando também o bom resultado do mix 2 na camada superficial.

O mínimo necessário para o desenvolvimento radicular satisfatório seria uma macroporosidade em torno de 0,10 m³/m³ Vomocil e Flocker (1966) e Baver *et al.* (1972). Valores abaixo de 0,10-0,15 m³/m³ geralmente são considerados prejudiciais para o crescimento radicular e produtividade da maioria das culturas comerciais (Watanabe *et al.*, 2002). O solo analisado nesse artigo é um Argissolo de textura arenosa, então a macroporosidade tende a ter valores maiores do que os desejados, e apresentou valores médios próximos de 0,15-0,20 m³/m³ apesar de alguns tratamentos terem apresentado valores de 0,12-0,13 m³/m³ que é muito próximo do limite, foram valores considerados bons para uma boa produtividade e desenvolvimento de raízes. O mix 3 e o mix 1 foram os tratamentos que proporcionaram os maiores valores de macroporosidade, devido a diversidade de raízes em profundidade.

Não houve diferença para a microporosidade em nenhuma das camadas analisadas entre nenhum dos tratamentos. Segundo Bonini *et al.* (2015), o manejo do solo afeta pouco a microporosidade do solo, principalmente, quando comparado a macroporosidade, pois está intimamente relacionada com a textura do solo. Os níveis definidos como ideais de microporosidade para a produtividade agrícola segundo Azevedo e Dalmolin (2006) é acima de

0,33m³/m³. Os valores observados estão muito abaixo dos níveis ideais, indicando um solo muito solto e com pouca retenção de água, típico de textura arenosa, além do pouco tempo de cultivo das plantas de cobertura.

A porosidade total e a densidade do solo geralmente são inversamente proporcionais, na camada superficial (0,0-0,05 m) é possível observar que os tratamentos mix 1 com inoculação e mix 3 sem inoculação foram os que proporcionaram maior porosidade total e menor densidade do solo. Os mesmos tratamentos também apresentaram comportamentos semelhantes nas outras duas camadas analisadas (0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m) principalmente o mix 3 sem inoculação. Isso pode ser explicado pelo sistema radicular das espécies presentes no mix 3, as gramíneas apresentam um sistema radicular mais profundo e agressivo em relação as leguminosas, e pelos resíduos deixados no solo, que possuem menos massa por unidade de volume em comparação com os minerais do solo, influenciando significativamente na densidade do solo (Chaudhari, Ahire, Ahire, Chkravarty e Maity, 2013).

De forma geral, o desejado é que os tratamentos proporcionem maior porosidade total e menor densidade do solo, para que não haja compactação do solo e dificuldades para planta em conseguir se desenvolver e crescer, porém em solos arenosos o aumento da densidade do solo pode ser benéfico, pois melhora a estrutura e a retenção de água, contando que respeite o limite crítico de 1,50-1,60 g/m³. O mix 3 com inoculação foi o tratamento que proporcionou maior densidade do solo na camada superficial com 1,39 Mg/m³ e na camada mais profunda com 1,45 Mg/m³, enquanto que na camada subsuperficial foi o tratamento mix 1 sem inoculação com 1,39 Mg/m³. Todos os valores estão dentro do limite crítico.

O mix 3 e mix 2 sem inoculação foram os tratamentos que proporcionaram as maiores taxas de infiltração de água no solo, sendo o mix 3 sem inoculação o tratamento que também proporcionou maiores valores de macroporosidade, pois a infiltração e movimentação da água no solo é influenciada principalmente pela porosidade. Onde os macroporos são responsáveis pela passagem rápida e infiltração de água no solo (Luxmoore, 1981; Messing & Jarvis, 1993). As raízes das plantas de cobertura geralmente causam o aumento dos macroporos do solo e consequentemente melhoram a taxa de infiltração de água (Haruna *et. al.*; 2020). Porém em solos arenosos, a quantidade de macroporos é naturalmente maior, nesses casos o aumento dos macroporos não é tão vantajoso quanto aumentar a matéria orgânica e melhorar a agregação do solo (microporos).

7. CONCLUSÃO

A inoculação com microrganismos solubilizadores de fósforo nos mixes de plantas de cobertura proporcionou aumento do incremento de carbono orgânico, matéria orgânica do solo, estoque de carbono e produtividade de grãos do feijão em todas as camadas analisadas, sendo uma prática promissora para o manejo sustentável.

O mix 1 e 2 foram mais eficientes na melhora da qualidade estrutural de um solo arenoso, principalmente no aumento de estabilidade de agregados do solo.

A combinação do mix 1 e mix 2 com inoculação de microrganismos solubilizadores de fósforo proporcionaram a melhor qualidade do solo.

REFERÊNCIAS

- ABDOLLANI, L., MUNKHOLM, L. J., & GARBOUT, A. (2014). Tillage system and cover crop effects on soil quality: II. Pore characteristics. **Soil Science Society of America Journal**, 78, 271–279. DOI: <https://doi.org/10.2019.1709490>
- ADHIKARI, A.D.; SHRESTHA, P.; GHIMIRE, R.; LIU, Z.; POLLOCK, D.A.; ACHARYA, P.; ARYAL, D.R. Cover crop residue quality regulates litter decomposition dynamics and soil carbon mineralization kinetics in semi-arid cropping systems. *Applied Soil Ecology*, v.193, e105160, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105160>.
- ALENCASTRO, R.B.G. **Produtividade e qualidade de forragem de Trigo Mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench L.) para a alimentação de ruminantes**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014. 46p. Dissertação de Mestrado.
- ALEXANDRE, L.S. **Cultivo de feijão em sucessão a culturas de cobertura e milho safra em solo arenoso**. Trabalho de Conclusão de Curso – UNESP. Dracena, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/f0e903ba-150b-4da5-bc92-bfd33472b135/content>. Acesso em: 22/11/2025.
- ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001.
- ALVARENGA+, R.C.; PASSOS, A.M.A.; SANTOS, F.C. Sistema de plantio direto. In: M.M. NOBRE & I.R. OLIVEIRA. *Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação*. Brasília, DF: **EMBRAPA**, 2018.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. S. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 13, n. 4, p. 382-388, 2009.
- ANDRIOLI, I.; PRADO, R. M. Plantas de Cobertura em pré-safra e adubação nitrogenada na fertilidade do solo em diferentes camadas, cultivado com milho em sistema de plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, n.3, p.963-978, maio/jun. 2012.
- ANGERS, D.A. & MEHUYS, G.R. Aggregate stability to water. In: CARTER, M.R. *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton, **Canadian Society of Soil Science**/Lewis Publishers, 2000.
- ARAÚJO, J.; URBANO, B.; GONZÁLEZ-ANDRÉS, F. Comparative environmental life
- AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. 2. ed. Santa Maria: Pallotti, 2006. 100 p.
- BALBONTÍN, C. et al. Treatment with 1-MCP and the role of ethylene in aroma development of mountain papaya fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v.43, n.1 p.67-77, 2007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925521406002122>. Acesso em: 24/11/2025.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, 1972. 529p.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A; CAMARGO, F.A.O. (ed). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.

Ben Kalifa, M. L., Vanvolkenburg, H., & Vasseur, L. (2023). Testing cover crop species under three soil moisture conditions in a controlled greenhouse environment. *Can. J. Plant Sci.*, 103, 175–183. DOI: 10.1139/CJPS-2022- 0188.

BERTOLINO, K.M. **Consórcio de Crotalária e Milheto: Produção de biomassa e características físicas do solo**. Dissertação – Mestre. Universidade Federal de Lavras, Lavras MG, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/server/api/core/bitstreams/249378b3-bb63-4d7e-beab-b4aaec935039/content>. Acesso em: 24/11/2025.

BHATTACHARYYA, S.S.; ROS, G.H.; FURTAK, K.; IQBAL, H.M.N.; PARRA-SALDÍVAR, R. Soil carbon sequestration – an interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. *Science of the Total Environment*, v.815, e152928, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.152928>.

BISHT, M.; NATUNG, N.T.; SINGH, G.K. e SANGTAM, S.L. (2023). Study on controlling of soil erosion by soil conservation techniques. **Journal of Environmental Engineering and Its Scope**, 6(2), 1–13.

Bonini, C. S. B.; Alves, M. C. & Montanari, R. (2015). Recuperação da estrutura de um Latossolo vermelho degradado utilizando lodo de esgoto. *Agrária - Revista Brasileira De Ciências Agrárias*, 10(1), 34-42. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v10i1a4513>

Bonini, C. S. B.; Alves, M. C. Qualidade física de um latossolo vermelho em recuperação há dezessete anos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.4, p. 329-336. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400001>.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTARINI, R. Recuperação da estrutura de um Latossolo vermelho degradado utilizando lodo de esgoto. **Agrária**, v.10, n.1, p.34-42, 2015.

BROCH, D. L.; ROSCOE, R. **Fertilidade do solo, adubação e nutrição do crambe**. In: FUNDAÇÃO MS. Tecnologia e produção: crambe 2010. Maracajú: FUNDAÇÃO MS, v. 1, p. 22-36, 2010.

BRUGGEMAN, N., GESSLER, A., KAYLER, Z., KEEL, S.G., BADECK, F., BARTHEL, M., BOECKX, P., 2011. Carbon Allocation and Carbon Isotope Fluxes in the Plant-Soil-Atmosphere Continuum: A Review. *Biogeosciences* 8: 3457–89. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-8-3457-2011>

BURGESS, M.; MILLER, P.; JONES, C.; BEKKERMAN, A. Tillage of cover crops affects soil water, nitrogen, and wheat yield components. **Agronomy Journal**, vol. 106, no. 4, pp.1497-1508, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj14.0007>.

CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno no sudoeste do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1990. P37. (Boletim técnico, 35).

CALEGARI, A. Rotação de culturas e uso de plantas de cobertura, **Revista Agroecologia Hoje**, ano II, n.14, maio a junho de 2002 – Botucatu-SP.

CAMPOS, L. F. C. **Plantas de cobertura do solo e épocas de poda na videira em região tropical**. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água). Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 80 f. 2014.

CARNEIRO, M. A. C., et al. (2020). Atributos físicos do solo e produtividade de milho sob diferentes plantas de cobertura no Cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 44, e0200121. DOI: 10.36783/18069657rbcs20200121.

CARVALHO, A.M. de; COELHO, M.C.; DANTAS, R.A.; FONSECA, O.P.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; FIGUEIREDO, C.C. Chemical composition of cover plants and its effect on maize yield in no-tillage systems in the Brazilian savanna. *Crop and Pasture Science*, v.63, p.1075-1081, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP12272>

CARVALHO, A.M. de; JESUS, D.R. de; SOUSA, T.R. de; RAMOS, M.L.G.; FIGUEIREDO, C.C. de; OLIVEIRA, A.D. de; MARCHÃO, R.L.; RIBEIRO, F.P.; DANTAS, R. de A.; BORGES, L. de A.B. Soil carbon stocks and greenhouse gas mitigation of agriculture in the Brazilian Cerrado: a review. *Plants*, v.12, e2449, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12132449>

CARVALHO, A.M. de; SANTOS, D.C.R. dos; RAMOS, M.L.G.; MARCHÃO, R.L.; VILELA, L.; SOUSA, T.R. de; MALAQUIAS, J.V.; GONÇALVES, A.D.M. de A.; COSER T.R.; OLIVEIRA, A.D. de. Nitrous oxide emissions from a long-term integrated croplivestock system with two levels of P and K fertilization. *Land*, v.11, e1535, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11091535>.

CARVALHO, A.M. et al. Soil carbon dynamics in a long-term corn-soybean rotation system with cover crops in succession. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 60. 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/P54RCKC8BVSVBSFyXrVcz5z/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 25/11/2025.

CARVALHO, A.M.; RIBEIRO, L.R.P.; MARCHÃO, R.L.; OLIVEIRA, A.D.; PULROLNIK, K.; FIGUEIREDO, C.C. Chemical composition of cover crops and soil organic matter pools in no-tillage systems in the Cerrado. **Wiley – Soil Use and Management**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1135301/chemical-composition-of-cover-crops-and-soil-organic-matter-pools-in-no--tillage-systems-in-the-cerrado>. Acesso em: 25/11/2025.

CARVALHO, C.A.; FERREIRA, R.L.F.; ANDRADE, R.A.; BRITO, R.S.; PEREIRA, T.C.R.; LIMA, T.J.L. Atributos físicos em solos cultivados com plantas de cobertura. **Scientia Naturalis**, v. 2, n.1, p. 38-41, 2020. Disponível em: <https://teste-periodicos.ufac.br/index.php/SciNat/article/view/3655>. Acesso em: 25/11/2025.

CARVALHO, M. L.; VANOLLI, B. S.; SCHIEBELBEIN, B. E.; BORBA, D. A.; LUZ, F. B.; CARDOSO, G. M.; BORTOLO, L. S.; MAROSTICA, M. E. M.; SOUZA, V. S. Guia prático de plantas de cobertura: aspectos filotécnicos e impactos sobre a saúde do solo. Piracicaba -SP: Universidade de São Paulo -Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2022. p. 9 –64.

CARVALHO, R. M. M.; SILVA, M. R.; CARVALHO, F. C. T.; REBOUÇAS, R. H.; SOUSA, O. V. Bactérias Solubilizadoras de Fosfato em solo rizosférico da Caatinga. **Revista Geonorte – Edição Especial V. v. 7, n. 26, p. 48-60, 2016.**

CENTENO, L. N.; ARAÚJO, J. B.; MOURA, F. O. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31–37, 2017.

CHAJAL, I., YYN, R. J., MAYERS, D., & VAN EERD, L. L. (2020). Cumulative impact of cover crops on soil carbon sequestration and profitability in a temperate humid climate. **Scientific Reports**, 10(1), 13381. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70224-6>.

CHAPAGAIN, T.; LEE, E.A.; RAIZADA, M.N. The Potential of Multi-Species Mixtures to Diversify Cover Crop Benefits. **Sustentability**, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/2058>. Acesso em: 26/11/2025.

CHAUDHARI, P. R., AHIRE, D. V., AHIRE, V. D., CHKRAVARTY, M., & MAITY S. (2013). Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. *International Journal of Scientific and Research*, 3, 1–8. DOI: <http://doi.org/10.15373/22778179/MARCH2014/162>

CHOWDHURY, S.; BOLAN, N.; FARRELL, M.; SARKAR, B.; SARKER, J.R.; KIRKHAM, M.B.; HOSSAIN, M.Z.; KIM, G.-H. Role of cultural and nutrient management practices in carbon sequestration in agricultural soil. *Advances in Agronomy*, v.166, p.131-196, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2020.10.001>

COLODETTI, T.V.; MARTINS, L.D.; RODRIGUES, W.N.; BRINATE, S.V.B.; TOMAZ, M.A. Crambe: aspectos gerais da produção agrícola. **ENCICLOPÉDIA BIOESFERA, Centro Científico Conhecer** – Goiânia, v.8, n. 14, p. 258, 2012. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2012a/agrarias/crambe.pdf>. Acesso em: 26/11/2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – **CONAB**. O último levantamento da safra 2023/2024 estima produção de grãos em 298,41 milhões de toneladas. Brasília, 2023.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boas produtividades garantem produção de feijão em torno de 3 milhões de toneladas mesmo com menor área. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5011-boas-produtividades-garantem-producao-de-feijao-em-torno-de-3-milhoes-de-toneladas-mesmo-com-menor-area>. Acesso em: 26/11/2025.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; ULIAN, N. A.; COSTA, B. S.; PARIZ, C. M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Acúmulo de nutrientes e tempo de decomposição da palhada de espécies forrageiras em função de épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 3, p. 818-829, 2015

CRUSCIOL, C.A.C.; COTTICA, R.L.; LIMA, E.V.; ANDREOTTI, M.; MORO, E.; MARCON, E. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n.2, p. 161-168, 2005.

da SILVA, D. B., GUERRA, A. F., da SILVA, A. C., & PÓVOA, J. S. R. (2002). Avaliação de genótipos de mourisco na região do cerrado. **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**.

Da SILVA, G.A.A. **Influência do tratamento de sementes de feijão com diferentes espécies de bactérias do gênero *Bacillus* no crescimento e desenvolvimento da cultura**. Monografia, Instituto Federal Goiano. Cristalina – GO, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/5157>. Acesso em: 27/11/2025.

de CARVALHO, A. M., BUSTAMANTE, M. M. C., ALCANTARA, F. A., RESCK, I. S., e LEMOS, S. S. (2009). Characterization by solid-state CPMAS¹³C NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil. **Soil & Tillage Research**, 101, 100–107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.08.006>

De CARVALHO, A. M., COELHO, M. C., DANTAS, R. A., FONSECA, O. P., JÚNIOR, R. G., & FIGUEIREDO, C. C. (2012). Chemical composition of cover plants and its effect on maize yield in no- tillage systems in the Brazilian savanna. **Crop and Pasture Science**, 63(12), 1075–1081. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP12272>.

De CARVALHO, A. M., MARCHÃO, R. L., SOUZA, K. W., & BUSTAMANTE, M. M. C. (2014). Soil fertility status, carbon and nitrogen stocks under cover crops and tillage regimes. **Revista Ciência Agronômica**, 45, 914–921. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500007>.

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno**. Londrina: Iapar, 1992. 80p. (Circular, 73).

DI BENEDETTO, N. A.; CAMPANIELLO, D.; BEVILACQUA, A.; CATALDI, M. P.; CORBO, M.; SINIGAGLIA, M.; FLAGELLA, Z. **Characterization of autochthonous plant growth promoting bacteria in relation to durum wheat nitrogen use efficiency**. In: Proceedings of Plant Biology Europe Congress EPSO/FESPB, Prague Czech Republic, p. 26-30, 2016.

DI BENEDETTO, N. A.; CORBO, M. R.; CAMPANIELLO, D.; CATALDI, M. P.; BEVILACQUA, A.; SINIGAGLIA, M.; FLAGELLA, Z. The role of plant growth promoting bacteria in improving nitrogen use efficiency for sustainable crop production: a focus on wheat. **Microbiology**, v.3, n.3, p.413- 434, 2017.

DUVAL, M. E., MARTINEZ, J. M., & GALANTINI, J. A. (2020). Assessing soil quality indices based on soil organic carbon fractions in different long-term wheat systems under semiarid conditions. **Soil Use and Management**, 36, 71–82. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12532>.

EMBRAPA. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijão-comum em sucessão. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1084251/plantas-de-cobertura-e-seus-efeitos-sobre-o-feijao-comum-em-sucessao>. Acesso em: 27/11/2025.

FAO. FAO Statisttical Yearbook. FAO Statistics Division. (2011).

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

Fertilizer applications for legumes in the Caribbean region. **Journal Clean Prod**, 267:1–11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122065>.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

FORSTER, P.; STORELVMO, T.; ARMOUR, K.; COLLINS, W.; DUFRESNE, J.-L.; FRAME, D.; LUNT, D.J.; MAURITSEN, T.; PALMER, M.D.; WATANABE, M.; WILD, M.; ZHANG, H. The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; BERGER,

S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M.I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J.B.R.; MAYCOCK, T.K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, B. (Ed.). *Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p.923-1054. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>.

GONÇALVES, F.M.F.; PORTO, P.P.; SILVA, R.M.G.; MELLO-PEIXOTO, E.C.T. Trigo mourisco: perspectiva de utilização na agropecuária. **Biológico**, v. 76, n. 2, p. 79-155, 2014.

GORGEN, A. V. (2013). **Produtividade e qualidade da forragem de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) e de trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*. Moench) cultivado no Cerrado.**

GORGEN, A.V.; CABRAL FILHO, S.L.S.; LEITE, G.G.; SPEHAR, C.R.; DIOGO, J.M.S.; FERREIRA, D.B. Produtividade e qualidade da forragem de trigo-mourisco (*Fagopyrum esculentum* Moench) e de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R.BR). **Rev. Bras. Saúde Prod. Anim.**, Salvador, v. 17, n.4 p. 599-607, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-99402016000400004>.

HANSEN, P. H.; SILVA, D. M.; LANZANOVA, L. S.; GUERRA, D.; LANZA-NOVA, M. E.; SOUZA, E. L.; BOHRER, R. E. G. Nabo forrageiro: potencialidades da espécie como descompactador do solo, reciclador de nutrientes e produtor de biomassa. *Research, Society and Development*, Itabira -MG, v. 12, n. 2, p. 1 –12, 2023.

HARUNA, S. I.; ANDERSON, S. H.; UDAWATTA, R. P.; GANTZER, C. J.; PHILLIPS, N. C.; CUI, S.; GAO, Y.; Improving soil physical Properties through the use of cover crops: A review. **Agrosystems, geosciences & environment**. 2020. DOI: 10.1002/agg2.20105

HOLANDA, SF., VARGAS, L.K. e GRANADA, E.C. Challenges for sustainable production in sandy soils: A review. **Environment, Development and Sustainability**. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03895-6>.

HOUSMAN, M.; TALLMAN, S.; JONES, C.; MILLER, P.; ZABINSKI, C.A. Soil biological response to multi-species cover crops in the Northern Great Plains. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, vol. 313, no. 1, pp. 107373. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2021.107373>.

HUANG, J.; HARTEMINK, A.E. (2020). Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth Science Reviews**, 208, 103295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>.

JHS Sementes. Cultivar IPR Sabiá. Disponível em: http://www.sementesjhs.com.br/ipr_sabia/. Acesso em: 28/11/2025.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Ed. Universidade de Passo Fundo. 3ª edição, 2014.

KLEIN, V. A., NAVARINI, L. L., BASEGGIO, M., MADALOSSO, T., & COSTA, L. O. (2010). Trigo mourisco: uma planta de triplo propósito e uma opção para rotação de culturas em áreas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, 117

KOPITTKKE, P.; MENZIES, N.W.; WANG, P.; MCKENNA, B.A e LOMBI, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environmental International**, 132, 105078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.

KUMAR, R.; FARDA, B.; MIGNINI, A. et al. Microbial Solutions in Agriculture: Enhancing Soil Health and Resilience Through Bio-Inoculants and Bioremediation. MDPI, **Bacteria**, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2674-1334/4/3/28>. Acesso em: 01/12/2025.

LATATI, M., BARGAZ, A., BELARBI, B., LAZALI, M., BENLAHRECH, S., TELLAH, S., & OUNANE, S. M. (2016). The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. **European journal of agronomy**, 72, 80-90

LIMA, B.C. **Atenuação do estresse por alta temperatura durante o estágio reprodutivo do feijoeiro-comum, em função da inoculação de *Bacillus subtilis***. Dissertação – Mestrado. Unoeste, Presidente Prudente, 2020. Disponível em: <http://bdtd.unoeste.br:8080/tede/handle/jspui/1345>. Acesso em: 01/12/2025.

LIMA, L. F. F. G. **Coberturas de solo para plantio direto e convencional de berinjela**. Trabalho de conclusão de curso – UNESP. 2025. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/f48759d8-1e7e-4680-9673-6c9cbadd8fa6/content>. Acesso em: 02/12/2025.

LOSS, A., M.G. PEREIRA, L.H.C. ANJOS, S.J. BEUTLER, E.P. FERREIRA & E.M.R. SILVA. 2011b. Oxidizable organic carbon fractions and soil aggregation in areas under different organic production systems in Rio de Janeiro, Brazil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems** 14: 699-708.

LOSS, Arcângelo et al. Agregação, matéria orgânica leve e carbono mineralizável em agregados do solo. **Revista de la Facultad de Agronomía**, La Plata, v. 113, n. 1, p. 1-8, 2014.

LOZANO OLIVÉRIO, GABRIELA; DOS SANTOS BATISTA BONINI, CAROLINA; FERNANDA DIAS SOUZA, JÉSSICA; LUÍS SANCHEZ PERUSSO, RAFAEL; MEIRELLES, GUILHERME CONSTANTINO; ANDRIGHETTO, CRISTIANA; CARLOS LUPATINI, GELCI; PAVAN MATEUS, GUSTAVO; LAPAZ, ALLAN DE MARCOS; HEINRICHS, REGES; MOREIRA, ADÔNIS. Water Infiltration, Resistance to Penetration and Soil Moisture in Integrated Agricultural Yield Systems over Time. Communications in Soil Science and Plant Analysis. **JCR**, v.53, p.327 - 336, 2021.

LUXEMOORE, R. J. (1981). Micro-, meso-, and macroporosity of soil. **Soil Science Society of America Journal**, 45, 671–672. DOI: <http://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500030051x>

LYNCH, J.; CAIN, M.; FRAME, D.; PIERREHUMBERT, R. Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO2-emitting sectors. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v.4, e518039, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.518039>.

Macedo, L. C. P. et al. (2019). Phenology and dry mass production of *Urochloa plantaginea* and *Urochloa platyphylla* submitted to different water quantities in the soil. **Acta Sci. Biol. Sci.**, 41, e46127. DOI: 10.4025/actascibiols.v41i1.46127.

MARCANTE, N.C.; CAMACHO, M.A.; PAREDES, F.P.J. Teores de nutrientes no milho como cobertura de solo. **Bioscience Journal, Agricultural Sciences**, v. 27, n. 2. 2011. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7564>. Acesso em: 02/12/2025.

MARRIS, E. A World Without Soil: The Past, Present, and Precarious Future of the Earth Beneath Our Feet. **NATURE**, 601 (7894), 503-504. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00158-8>.

MARTINS, M.V.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum, Agronomy**, Maringá, v. 31, n.1, p. 147-154, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/cgcNLXJrpXSpHqk3QY7d6zr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 03/12/2025.

MEDEIROS, M.N.V. Influência de frequências de irrigação no crescimento e produção da cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). Monografia, Universidade Federal de Campina Grande, POMBAL, 2024. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/43540>. Acesso em: 02/12/2025.

MELO, R.S.; RAMOS, M.R. Solos de textura arenosa: uma revisão acerca do uso e manejo no estado do Tocantins. *Rev. Sapiência*, v. 14, n. 01, p. 01-22, 2025. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/sapiencia/article/view/15157/11570>. Acesso em: 02/12/2025.

MESSING, I., & JARVIS, N. J. (1993). Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers. **European Journal of Soil Science**, 44, 11–24. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00430.x>

MICHELON, C. J., JUNGES, E., CASALI, C. A., PELLEGRINI, J. B. R., NETO, L. R., de OLIVEIRA, Z. B., & de OLIVEIRA, M. B. (2019). Atributos do solo e produtividade do milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18(2), 230-239

Nascente, A. S.; Stone, L. F. (2018). Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. *Rice Sci.*, 25, 340–349. DOI: 10.1016/j.rsci.2018.10.004.

NISHIGAKI, T., SUGIHARA, S., KILASARA, M., FUNAKAWA, S. (2021). Carbon dioxide flux and soil carbon stock as affected by crop residue management and soil texture in semi-arid maize croplands in Tanzania. **Soil Use and Management**, 37, 83–94. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12680>.

OLIVEIRA, C. A.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M.; LANA, U. G. P.; SANTOS, F. C.; JUNIOR, A. S. P.; ALVES, V. M. C. Viabilidade Técnica e Econômica do Biomaphos (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas culturas de Milho e Soja. **Embrapa Milho e Sorgo**. Sete Lagoas – MG, 2020.

OLIVEIRA, G.S.; de SOUSA, G.G.; VIANA, T.V.A.; PEREIRA, M.J.L.; LEITE, K.N.; de SOUSA, L.V.; MENDONÇA, A.M.; SANTOS S.O. Desempenho agrônomo da cultura do sorgo sob estresse salino em solo com cobertura morta vegetal. *Rev. Caatinga*, Mossoró, v. 37, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/GdxgySMWT7YBTh97MnnpWcK/?format=html&lang=en>. Acesso em: 25/11/2025.

OLIVEIRA, J.T.; ROQUE, C.G.; BORGES, M.R.Z.; MINOTTO, V.A.; JAVAREZ, A.L. Correlação espacial entre atributos químicos de um latossolo vermelho e produtividade de grãos

de feijoeiro. **Rev. Eng. Na Agric.** 2020, 28, 425–434. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347474641_SPATIAL_CORRELATION_BETWEEN_THE_CHEMICAL_ATTRIBUTES_OF_A_RED_LATOSOL_AND_THE_GRAIN_YIELD_OF_COMMON_BEAN. Acesso em: 03/12/2025.

OLIVEIRA, M. S. P et al. (2016) **Densidade e comprimento radicular de crotalária e milho em camadas compactadas de solo.** In: V CONGRESSO ESTADUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO IF GOIANO –CAMPUS IPORÁ, 2016, Iporá, GO. Anais... Iporá, GO: 21 a 23 de setembro de 2016, p.1-2.

OLIVEIRA, N.S., SCHIAVO, J.A., LIMA, M.F., LARANJEIRA, L.T., NUNES, G.P., CRUZ, S.C., 2021. Isotopic variations of carbon and nitrogen and their implications on the conversion of Cerrado vegetation into pasture. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v.56 n.2 , 266-273.. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z21769478845>

PACHECO, L. P., et al. (2017). Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura no Cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21(10), 679-684. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n10p679-684.

PACHECO, L.P.; SÃO MIGUEL, A.S.D.; SILVA, D.M.B.; de SOUZA, E.D.; da SILVA, F.D. Influência da densidade do solo em atributos da parte aérea e sistema radicular de crotalária. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 464-472, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/LcTKSpWFhySWrgZwPYpsPBF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10/12/2025.

PAIVA, C. A. O.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS, F. C.; TINOCO, S. M. S.; LANA, U. G. P.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B. B.; ALVES, V. M.C.; RIBEIRO, V. P.; JUNIOR, R. V. Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho. **Embrapa Milho e Sorgo**. Sete Lagoas – MG, 2020.

PALADINI, F.L.S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p. 135-140, 1991.

Pariz, C. M. et al. (2020). An innovative corn to silage-grass-legume intercropping system with oversown black oat and soybean to silage in succession for the improvement of nutrient cycling. *Front. Sustain. Food Syst.*, 4, 544996. DOI: 10.3389/fsufs.2020.544996.

PAULETTI, D.R. **Influência das plantas de cobertura nas características produtivas da alface e nos atributos físicos e químicos do solo.** Dissertação – Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marialva Cândido Rondon – PR, 2012. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/1435/1/Daiana_Pauletti_2012. Acesso em: 28/08/2025.

PAULETTI, V.. **Manual de Adubação e calagem para o estado do Paraná.** 2. ed. Curitiba: SBCS, 2019, 289 p.

PAUSTIAN, K.; LARSON, E.; KENT, J.; MARX, E.; SWAN, A. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Frontiers in Climate*, v.1, e482133, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>.

PEREIRA, W.J. Herbicidas ACCase no controle de capim-coralina, capim-amargoso e capim-pé-de-galinha e efeito residual na cultura do milho. Dissertação – Mestrado, Instituto Federal

Goiano, Urutaí, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/3601>. Acesso em: 24/07/2025.

PEREZ, S. C. J. G. A. Limites de temperatura e estresse térmico na germinação de sementes de *Peltophorium dubium*. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 20, n.1, p. 134-142, 1998.

PESSOA, G.M.; da SILVA, M.G.; da COSTA, B.F.; BRITO e SILVA, G.L. Acúmulo de nutrientes e produtividade de diferentes plantas de cobertura na região de Aquidauana. *Rev. Caderno pedagógico*, Curitiba, v. 21, n. 10, p. 01-19. 2024. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/8818/5236>. Acesso em: 10/07/2025.

Petter, F. A. et al. (2013). Desempenho de plantas de cobertura submetidas à déficit hídrico. *Semin. Ciências Agrárias*, 34, 3307–3319. DOI: 10.5433/1679-0359.2013v34n6supl1p3307.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002.

PINEDA, M. E. B. La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. **Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria**. v. 15, n.1, p. 101- 113, 2014.

PIRES, F. R.; ASSIS, R. L de; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; SANTOS, S. C.; VIEIRA NETO, S. A.; SOUZA, J. P. G. de. Desempenho agrônômico de variedades de milho em razão da fenologia em pré-safra. **Bioscience Journal**, Uberlândia. v. 23, n. 3, p. 41-49, 2007.

RAZERA, R. **Modificação nas propriedades de solo arenoso pela aplicação de resíduos estéreis de mineração**. Dissertação – Mestrado. Piracicaba, 2025. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/111140/tde-04022025-120841/pt-br.php>. Acesso em: 05/02/2026.

RIOS, M. Nabo forrageiro é opção na reforma de canaviais. **Jornal Cana**, Adamantina, p. 30-31, 2008.

ROCHA, D.R. Estoque de carbono com uso de fertilizantes organominerais associado com o uso de plantas de cobertura no cultivo de soja. Monografia. Universidade Federal de Mato Grosso do sul. Chapadão do sul, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/13330>. Acesso em: 18/07/2025.

Rodrigues, C. I. D., Brito, L. M., & Nunes, L. J. (2023). Soil carbon sequestration in the context of climate change mitigation: A review. *Soil Systems*, 7(3), 64.

ROSOLEM, C. A., Li, Y. e GARCIA, R. A. (2016). Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use and Management**, 32, 495–503. <https://doi.org/10.1111/sum.12309>.

SÁ, F. V. S. et al. Growth and biomass in saccharine sorghum plants irrigated with saline water under phosphate fertilizer. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 12: 2561-2569, 2018.

SALVADOR, K. R. S. et al. Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 14: 2322- 2343, 2021.

SALVIANO, A.M.; LIMA, A.M.N.; RAFAEL, M.P.S.; CUNHA, J.C.; SILVA, P.G. Plantas de cobertura em ambiente semiárido: produção de biomassa, adição de Carbono e de nutrientes ao solo. **Rev. Delos Desarrollo Local Sostenible**. Curitiba, v.16, n. 43, p. 835-852, 2023. doi: 10.55905/rdelosv16.n43-02. Disponível em:

<https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/872/826>. Acesso em: 25/07/2025.

SANCHEX, E. **Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno**. Dissertação – Mestrado. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Unicentro-PR, 2012. Disponível em: <https://tede.unicentro.br/jspui/bitstream/tede/127/1/PRmestradoemmanuel Sanchez.pdf>. Acesso em: 04/02/2026.

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v.114, p.9575-9580, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>.

SANTANA, E.H.S.; VIANA, P.M.F. **Erosão Hidráulica Localizada em Solo arenoso na Subestação Urucuia 2: Um estudo de caso**. EEPEX – Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão, Universidade Estadual de Goiás, 2025. Disponível em: <https://www.anais.ueg.br/index.php/eepep/article/view/16696>. Acesso em: 04/02/2026.

SANTOS, F.L.S.; NEVES, G.; SENA-SOUZA, J.P.; VASCONCELOS, V.; NARDOTO, G.B.; Aplicação do $\delta^{13}\text{C}$ e do $\delta^{15}\text{C}$ em estudos sobre dinâmica da matéria orgânica em solos superficiais do Brasil: uma síntese e perspectivas. *Rev. Bras. De Geografia Física*, v. 18, n.3, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/262554/49423>. Acesso em: 05/02/2026.

SANTOS, G. G.; SILVEIRA, P. M.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; BECQUER, T. Atributos químicos e estabilidade de agregados sob diferentes culturas de cobertura em Latossolo do cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1171-1178, 2012.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**, 2025.

SANTOS, Maurício, Siqueira dos. Consórcio de Plantas de Cobertura é Estratégia Para Promover Boa Cobertura do Solo e Diversificar Espécies no Sistema Plantio Direto. **Mais soja**. Santa Maria-RS, 2022.

SATO, J. H., de FIGUEIREDO, C. C., MARCHÃO, R. L., de OLIVEIRA, A. D., VILELA, L., DELVICO, F. M., ALVES, B. J. R., e de CARVALHO, A. M. (2019). Understanding the relations between soil organic matter fractions and N₂O emissions in a long-term integrated croplivestock system. **European Journal of Soil Science**, 70, 1183– 1196. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12819>.

SEQUINATTO, L.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; MAZURANA, M.; MULLER, J. Qualidade de um Argissolo submetido a práticas de manejo recuperadoras de sua estrutura física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 18, no. 3, pp. 344-350. 2014.

SILVA, B. E.; DANTAS, Y. V. V.; CESCONE, J. V. F.; BONINI, H. C.; ROCHA, J. R.; Atributos físico-hídricos do solo sob diferentes plantas de cobertura consorciada com pimentado-reino. **Revista Observatorio de La Economía Latinoamericana**. Curitiba, v.22, n.10, p.01-23. 2024. DOI: 10.55905/oelv22n10-188.

SILVA, D. F.; GARCIA, P. H. M.; SANTOS, G. C. L.; FARIAS, I. M. S. C.; PÁ-DUA, G. V. G.; PEREIRA, P. H. B.; SILVA, F. E.; BATISTA, R. F.; GONZAGA NETO, S.; CABRAL, A. M. D. Características morfológicas, melhoramento ge-nético e densidade de plantio das culturas do sorgo e do milho: uma revisão. *Research, Society and Development*, Itabira -MG, v. 10, n. 3, p. 1 –9, 2021.

SILVA, D.B.; GUERRA, A.F.; SILVA, A.C.; PÓVOA, J.S.R. **Avaliação de genótipos de mourisco na região do Cerrado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento.** Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2002.

SILVA, D.B.; GUERRA, A.F.; SILVA, A.C.; PÓVOA, J.S.R. Avaliação de genótipos de trigo mourisco na região do Cerrado. Brasília: **Embrapa Cenargen**, 2002, 20p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 21).

SILVA, G. F.; ERASMO, E. A. L.; SARMENTO, R. A.; SANTOS, A. R.; AGUIAR, R. W. S. Potencial de produção de biomassa e matéria seca de milheto (*Pennisetum americanum* Schum.), em diferentes épocas nosul do Tocantins. **Bioscience Journal**, Uberlândia. v. 19, n. 3, p.31-34, 2003.

SILVA, L. O. C. et al. Ação de Eleusine coracana na remediação de solos contaminados com picloram. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 627-632, 2012.

SILVA, M.A.; NASCENTE, A.S.; FRASCA, L. L. M.; et al. Plantas de cobertura isoladas e em mix para a melhoria da qualidade do solo e das culturas comerciais no Cerrado. **Reserach, Society and Development**, v.10, n.12. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20008>

SILVA, M.P.; ARF, O.; de SÁ, M.E.; ABRANTES, F.L.; BERTI, C.L.F.; de SOUZA, L.C.D. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Rev. Bras. De Ciências Agrárias**, v. 12, n.1 p. 60-67, 2017. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1190/119050448010.pdf>. Acesso em: 10/07/2025.

SOUZA, G. G. et al. Saline water and nitrogen fertilization on leaf composition and yield of corn. *Revista Caatinga*, 35: 191-198, 2022.

SOUZA, A. D. V.; FÁVARO, S. P., ÍTAVO, L. C.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão-manso, nabo-forrageiro e crambe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 10, p. 1328-1335, 2009.

SOUZA, C. M. de; PIRES, F. R.; PARTELLI, F.L.; ASSIS, R.L. **Adubação verde de rotação de culturas.** Viçosa – MG: Ed. UFV, v. 1, n. 1, p. 108, 2013.

SOUZA, J. F. D.; **BONINI, C.S.B.**; MATEUS, G. P.; SOUZA, C. T.; PERUSSO, R. L. S.; PEDRO, F. G.; OLIVERIO, G. L.. Compactação do solo em sistemas de integração lavoura-pecuáriafloresta após cinco anos de implantação e uso. **REVISTA DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS**. v.19, p.348 - 353, 2020.

Souza, V. S., Santos, D. D. C., Ferreira, J. G., de Souza, S. O., Gonçalo, T. P., de Sousa, J. V. A., ... & Cherubin, M. R. (2024). Cover crop diversity for sustainable agriculture: Insights from the Cerrado biome. *Soil Use and Management*, 40(1), e13014.

TANG, J. RILEY, W.J. Revising the dynamic energy budget theory with a new reserve mobilization rule and three example applications to bacterial growth. *Soil Biology and Biochemistry*. V. 178, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108954>.

TEIXEIRA, C. M. et al. Decomposição e liberação de nutrientes das palhadas de milho e milho + crotalaria no plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.31, n.4, p.647-653, 2009.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. Brasília: **Embrapa**, 2017, 574p.

TEODORO, R. B. et al. Plantas de cobertura no semiárido brasileiro: Efeitos sobre a ciclagem de nutrientes e a produção de matéria seca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 9, p. 1099-1107, 2018. DOI: 10.1590/S0100-204X2018000900007.

TOMAZI, C.V.; BORSOI, A.; FABIAN, F.M. Produtividade e características agronômicas do trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*) em função da aplicação de nitrogênio em cobertura. **Rev. Cultivando o saber**. 2021. Disponível em: <https://cultivandosaber.fag.edu.br/index.php/cultivando/article/view/1080>. Acesso em: 10/07/2025.

TORRES, José Luiz Rodrigues et al. Physical attributes of an irrigated oxisol after brassicas crops under no-tillage system. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1825, 2022.

USMAN, M.; FAROOG, M.; WAKEEL, A.; NAWAZ, A.; CHEEMA, S.A.; REHMAN, H.U.R.; ASHRAF, I. e SANALLAH, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. **Science of the Total Environment, Elsevier BV**, 721, 137778. DOI://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778.

VEZZANI, Fabiane Machado and MIELNICZUK, João. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online]. 2011, vol.35, n.1, pp.213-223.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction storage and movement of soil, air and water. **American Society of Agricultural Engineering**, v.4, p.242- 246, 1966.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; PINTO, J. C.; COSTA, A. C. S.; MUNIZ, A. S. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. **Acta Scientiarum**, v.24, p.1255-1264, 2002.

WEIL, R. R.; NYLE C. B. **Arquitetura e propriedades físicas do solo** In: Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos, 2013.

WENDLER, E., & SIMONETTI, A. P. M. M. (2016). Uso de trigo mourisco sobre a germinação e desenvolvimento inicial de soja. **Revista Cultivando o Saber**, 119-128.

WIPAT, A.; HARWOOD, C.R. The *Bacillus subtilis* genome sequence: the molecular blueprint of a soil bacterium. **FEMS Microbiology Ecology**, v.28, n.1, p. 1-9, 1999.

WOLSCHICK, N. H., BARBOSA, F. T., BERTOL, I., dos SANTOS K. F., WERNER, R. D. S., e BAGIO, B. (2016). Canopy cover, biomass production and nutrient accumulation by cover crops. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 15(2), 134-143

WULANNINGTYAS H.S.; GONG, W.; LI, P.; SAKAGAMI, N.; NISHIWAKI, J.; KOMATSUZAKI, M.A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil & Tillage Research**, vol. 205, no. 1, pp. 104749. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104749>.

YAO, Z., XU, Q., CHEN, Y., LIU, N., HUANG, L., ZHAO, Y., ZHANG, D., LI, Y., ZHANG, S., CAO, W., ZHAI, B., WANG, Z., ALD, S., GAO, Y. (2019). Enhanced stabilization of soil organic carbon by growing leguminous green manure on the Loess Plateau of China. **Soil Science Society of America Journal**, 83, 1722–1732. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.03.0089>.

YAO, Z., XU, Q., CHEN, Y., LIU, N., HUANG, L., ZHAO, Y., ZHANG, D., LI, Y., ZHANG, S., CAO, W., ZHAI, B., WANG, Z., ALD, S., & GAO, Y. (2019). Enhanced stabilization of soil organic carbon by growing leguminous green manure on the Loess Plateau of China. **Soil Science Society of America Journal**, 83, 1722–1732. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.03.0089>.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, 19:1467-1476, 1988.

ZECCHIN S., VALLI, C.; MELZI, A. et al. Winter cover cropping increases synergistic species interactions and plant growth-promoting traits involved in phosphorus and nitrogen cycling in rice rhizosphere microbiome. **Soil ecology**, v. 218, 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139325008297>. Acesso em: 16/07/2025.

ZHANG, R. Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 1024–1030, 1997.

ZIECH A. R. D., CONCEIÇÃO, P. C., LUCHESE, A. V., BALIN, N. M., CANDIOTTO, G., & GARMUS, T. G. (2015). Proteção do solo por plantas de cobertura de ciclo hibernar na região Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 50, 374-382.

Zuffo, A. M. et al. (2022). Silicon mitigates the effects of moderate drought stress in cover crops. *J. Agron. Crop Sci.*, 208, 887–897. DOI: 10.1111/jac.12548.

ZUFFO, A.M.; STEINER, F.; AGUILERA, J.G.; ARANIBAR, L.M.; MARTINEZ, L.A. Resiliência de plantas de cobertura à seca. *Trends in Agricultural and Environmental Sciences*. 2024.