

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Gabriel Augusto da Silva Lunardelli

**Avaliação de atributos físicos de um Argissolo Vermelho
Amarelo distrófico no cultivo de milho consorciado com
plantas de coberturas e adubação nitrogenada**

Dracena

2025

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Gabriel Augusto da Silva Lunardelli

**Avaliação de atributos físicos de um Argissolo Vermelho
Amarelo distrófico no cultivo de milho consorciado com
plantas de coberturas e adubação nitrogenada**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas
– Unesp, Câmpus de Dracena como parte das
exigências para graduação Engenharia
Agrônômica.

Orientadora: Profa. Dra. Carolina dos Santos Batista Bonini

Co-orientador: Prof. Dr. Vagner do Nascimento

Dracena

2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: *Avaliação de atributos físicos de um Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico no cultivo de milho consorciado com plantas de cobertura e adubação nitrogenada.*

Modalidade: Trabalho de Atividades de pesquisa.

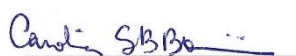
Autor: Gabriel Augusto da Silva Lunardelli

Orientador (a): Profa. Dra. Carolina dos Santos Batista Bonini

Co-orientador(es): Prof. Dr. Vagner do Nascimento

Número de Créditos: 12

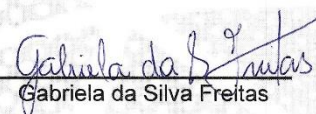
Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 29/10/2025



Profa. Dra. Carolina dos
Santos Batista Bonini



Prof. Dr. Vitor Corrêa de
Mattos Barretto



Gabriela da Silva Freitas

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Carlos Alberto Lunardelli e minha mãe Helena Caetano Lunardelli, por sempre me apoiar e incentivar para que eu conquistasse tudo aquilo que almejo. O amor de vocês que tornou tudo isso realidade.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradecer a Deus por me guiar e proteger para que eu conquistasse tudo aquilo que sonho.

Ao meu falecido pai Carlos Alberto Lunardelli, por ser meu exemplo máximo de como é ser verdadeiramente um homem, graças aos seus ensinamentos que sou quem sou hoje.

À minha amada mãe Helena Caetano Lunardelli, por ser minha melhor amiga, a pessoa que sempre está do meu lado para me apoiar, e enfrentar todos e qualquer obstáculo ao meu lado.

Ao meu querido irmão Pedro Vitor, por sempre estar mesmo do meu lado, mesmo muitas vezes eu sendo uma pessoa difícil.

Aos meus avós maternos, Rosa e Sebastião, e aos meus avós paternos, Maria Zelinda e Alberto, por todo carinho e amor doados a mim, amor que sonho em um dia poder agradecer e retribuir.

A todos meus familiares que participam da minha vida, me apoiando e aconselhando, sempre buscando o meu bem-estar.

À minha orientadora Profa. Dra. Carolina Bonini, pela confiança, paciência e principalmente pelos ensinamentos a mim passados, que fazem de mim, a cada dia, um profissional melhor.

Aos meus professores, em especial ao Prof. Dr. Vitor Barreto, Prof. Dr. Vagner do Nascimento e o Prof. Dr. Reges Heinrichs por todo o conhecimento a mim passado durante toda a graduação, foram de grande importância para meu crescimento profissional.

Aos meus amigos de infância, Livia Gomes, Daniel Freitas e Thyeza Tedesco, por serem meu porto seguro, em momentos de dificuldades, e por estarem sempre do meu lado, dividindo momentos felizes e sorrisos.

À minha prima Patrícia Lunardelli, por ser praticamente uma irmã mais velha para mim, estando comigo em todos os momentos me aconselhando e ensinando.

Aos meus amigos da faculdade, em especial, Amanda Leticia, Julia Goia, Bruna Silva, Leticia Garcia e Jaqueline Brassica, por sempre estarem alegrando meus dias e me proporcionando momentos felizes.

À minha amiga Ana Carolina Pereira, por ser nos últimos tempos meu ponto de equilíbrio, se tornando para mim uma irmã de outra mãe.

Aos meus colegas do grupo GENAP, em especial para Melissa Alexandre, por me orientar e ensinar como trabalhar no grupo.

Aos meus companheiros de república, que para mim, são a muito tempo minha segunda família, onde dividimos momentos ruins e momentos bons, mas sempre levando tudo com senso de humor e um sorriso no rosto.

Por último queria agradecer a Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT), UNESP, campus de Dracena/SP.

“As palavras só têm sentido se nos ajudam a ver o mundo melhor” (Rubem Alves, 2002).

RESUMO

O milho (*Zea mays* L.) tem uma ampla gama de utilizações, desde o consumo *in natura* até diversos usos industriais como a produção de biocombustíveis. A produção foi 141 milhões de toneladas na safra de 2024/2025, num total de 21 milhões de hectares de área agricultável (CONAB, 2025). O uso de sistemas de plantio convencional e monocultura atrelados a baixa fertilidade apresentada nos solos brasileiros em modo geral, provocam prejuízos a produção e danos a estrutura do solo. Sistemas mais conservacionistas como o de plantio direto, com a utilização de culturas de cobertura e adubações nitrogenadas tornam-se alternativas viáveis para o aumento produtivo da lavoura, aumentar a fertilidade e favorecer a manutenção e recuperação físico do solo. O objetivo do trabalho foi avaliar atributos físicos de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico sob o cultivo de milho (*Zea mays* L.) em consórcio com plantas de cobertura e adubação nitrogenada. Para isso foram determinadas a agregação, textura, microporosidade, macroporosidade, porosidade total e densidade do solo nas profundidades de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. O experimento foi realizado na área experimental da FCAT/Unesp – Dracena no ano de 2023. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico de textura arenosa. O experimento foi conduzido em delineamento foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4 x 4, sendo os tratamentos compostos pelo cultivo de milho em monocultivo e em consórcio com espécies de cobertura (*Crotalaria spectabilis*, *Urochloa ruziziensis* e um consórcio entre ambas), associado à aplicação de quatro doses de ureia (46% de N): 0, 40, 80 e 120 kg/ha⁻¹ de fertilizante. Para a análise de estatística, os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) pelo teste F, utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação das medias com auxílio do programa estatístico SISVAR®. Pelos resultados obtidos, o consórcio de milho com plantas de cobertura apresentou melhor desempenho nos atributos físicos do solo em relação ao milho solteiro, destacando-se o tratamento milho + crotalária com 80 kg/ha de ureia. Esse sistema proporcionou maior resistência e formação de agregados, além de elevar a macroporosidade e reduzir a microporosidade, resultados associados ao aumento do diâmetro médio ponderado (DMP) e da proporção de macroagregados.

Palavras-chave: Agregados do solo; Porosidade do solo; Densidade do solo

ABSTRACT

Corn (*Zea mays* L.) has a wide range of uses, from fresh consumption to several industrial applications, such as biofuel production. In the 2024/2025 growing season, production reached 141 million tons, with a total of 21 million hectares of cultivated area (CONAB, 2025). The use of conventional tillage systems and monoculture, combined with the generally low fertility of Brazilian soils, causes production losses and structural degradation. More conservation-oriented systems, such as no-tillage with the use of cover crops and nitrogen fertilization, become viable alternatives to increase crop productivity, improve soil fertility, and promote the maintenance and recovery of soil physical quality. The objective of this study was to evaluate the physical attributes of a dystrophic Red-Yellow Argisol under corn (*Zea mays* L.) cultivated in consortium with cover crops and nitrogen fertilization. Aggregation, texture, microporosity, macroporosity, total porosity, and soil bulk density were determined at the depths of 0.00–0.10 m and 0.10–0.20 m. The experiment was carried out in 2023 at the experimental area of FCAT/Unesp – Dracena. The soil of the area is classified as a typical dystrophic Red-Yellow Argisol with sandy texture. The experiment followed a randomized block design in a 4 × 4 factorial scheme, with treatments consisting of corn in monoculture and in consortium with cover crop species (*Crotalaria spectabilis*, *Urochloa ruziziensis*, and a mixture of both), combined with four urea rates (46% N): 0, 40, 80, and 120 kg ha⁻¹. For statistical analysis, the data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using the F-test, and treatment means were compared using Tukey's test at 5% probability, with the aid of SISVAR® software. The results showed that corn intercropped with cover crops performed better in terms of soil physical attributes compared with sole-crop corn, with the treatment corn + *Crotalaria* at 80 kg/ha⁻¹ of urea standing out. This system increased aggregate resistance and formation, enhanced macroporosity, and reduced microporosity, outcomes associated with higher weighted mean diameter (WMD) and greater proportions of macroaggregates.

Keywords: Soil aggregates; Soil porosity; Soil bulk density

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Análise da estabilidade de agregados em água.....	26
Figura 2 - Análise de porosidade e densidade	28
Figura 3 - Análise de Textura do solo.....	30
Figura 4 - Porcentagem de macroagregados	35
Figura 5 - Porcentagem de microagregados	36
Figura 6 - Granulometria da área em estudo.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do teste F, CV (%) e valores médios do diâmetro médio ponderado e diâmetro das peneiras	31
Tabela 2 - Valores da interação do tratamento pelas doses de ureia para o diâmetro médio ponderado	32
Tabela 3 - Desdobramento da interação significativa da análise de variância referente a produtividade de matéria seca e acúmulo de nitrogênio (N) da parte aérea dos resíduos culturais	33
Tabela 4 - Valores do teste F, CV (%) e médios de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi); porosidade total do solo (PT) e densidade do solo (DS) dos tratamentos estudados	37
Tabela 5 - Valores da interação do tratamento pelas doses de ureia para macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) dos tratamentos estudados	39
Tabela 6 - Valores da interação do tratamento pelas doses de ureia para porosidade total do solo (PT) e densidade do solo (DS) dos tratamentos estudados	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.1 Objetivos Específicos.....	15
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1 Cultura do milho.....	17
3.2 Plantas de cobertura.....	17
3.3 Adubação nitrogenada.....	18
3.4 Agregados do solo.....	19
3.5 Porosidade e densidade do solo.....	21
3.6 Textura do solo.....	23
4 MATERIAIS E METODOS.....	24
4.1 Descrição da area experimental.....	24
4.2 Avaliações realizadas.....	25
4.3 Análise estatística.....	25
4.4 Estabilidade de agregados em água.....	26
4.5 Porosidade e densidade do solo.....	27
4.6 Textura do solo.....	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1 Estabilidade de agregados em água.....	31
5.2 porosidade e densidade do solo.....	37
5.3 Textura do solo.....	41
6 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L.*) caracteriza-se como uma cultura de elevada importância agrícola e econômica, apresentando ampla versatilidade de utilização, que abrange desde o consumo direto como alimento até múltiplas aplicações nos setores industrial e agroindustrial (Chieza, *et al.*, 2017). Porém, se utilizados os sistemas de plantio convencional associada a monocultura e o uso de máquinas para o preparo do solo, se feito de forma inadequada, eles podem gerar modificações negativas na qualidade do solo (Santos, 2022).

O nitrogênio é o nutriente mais exigido pela cultura do milho (Biancho *et al.*, 2022). O aumento da demanda pelo milho, acarreta a maior utilização de insumos, como os fertilizantes nitrogenados, o que gera aumento de custos e impactos ambientais ligados a produção e utilização de grandes quantidades fertilizantes, por conta desses fatores, o uso de estratégias de manejo que reduzam a utilização destes insumos são de grande importância (Longhini *et al.*, 2017).

O uso de sistemas de cultivo consorciado se destaca junto ao sistema plantio direto por serem mais sustentáveis, onde o uso de plantas de cobertura no sistema agrega incrementos nos teores de matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes no solo (Michelon *et al.*, 2019). A utilização de culturas de cobertura em consórcio a cultura do milho, contribui tanto para o aumento produtivo da lavoura, quanto para a melhora de atributos físicos do solo. A gama de espécies para uso consorciado é diversa, sendo escolhidas as que melhor permitem a recuperação da qualidade do solo (Mottin *et al.*, 2022). A utilização de plantas de cobertura em sistemas consorciados, além de exercer função protetiva sobre a superfície do solo, pode contribuir significativamente para a ciclagem e o fornecimento de nitrogênio, a depender das espécies adotadas, sobretudo das leguminosas com capacidade de fixação biológica (Cassol *et al.*, 2019).

Em comparação ao cultivo isolado, os sistemas de consórcio com plantas de cobertura apresentam potencial para promover melhorias integradas nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Além de favorecer a manutenção e recuperação da qualidade estrutural, esses sistemas contribuem para a proteção contra agentes intempéricos e para o incremento do teor de matéria orgânica, aspectos fundamentais

à sustentabilidade dos agroecossistemas e manutenção das propriedades físicas em condições adequadas.

Avaliar a qualidade física do solo, tem como intuito caracterizar a saúde diante de como ele é usado, pois a perda da qualidade física do solo, pela degradação, tende a ter efeitos como a diminuição de produtividade das culturas ali instaladas, em virtude das alterações provocadas nos atributos físicos e conseqüentemente nos químicos e biológicos do solo (Matos, 2022).

A caracterização das propriedades físicas do solo constitui etapa fundamental para a compreensão de dinâmica estrutural e dos processos que regulam interação com práticas de manejo. O conhecimento dessas propriedades permite avaliar a forma como influenciam a organização dos agregados, a distribuição da porosidade e a capacidade de retenção e transmissão de água e ar, subsidiando o desenvolvimento e a aplicação de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis, ajustadas às especificidades de cada ambiente edáfico (Zemolin, 2017).

Dessa forma, avaliamos como o consórcio do milho com diferentes plantas de cobertura, em conjunto com a aplicação de doses de nitrogênio, altera positivamente os atributos físicos de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, aumentando o aporte de matéria orgânica, promovendo maior agregação e porosidade do solo e reduzindo sua densidade aparente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O trabalho em questão, tem como principal objetivo avaliar as características físicas de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico após o cultivo de milho (*Zea mays*), consorciado com plantas de cobertura (*Urochloa ruziziensis*, *Crotalaria spctabilis* e um mix com as três espécies) e adubação nitrogenada com o uso de ureia (nas doses 0, 40, 80 e 120 kg/há do fertilizante).

2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar as melhorias na estruturação do solo;
- Determinar a distribuição e estabilidade dos agregados do solo;
- Determinar a macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo;
- Determinar a textura do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cultura do milho

Por ser um dos grãos mais produzidos e consumidos no mundo, a cultura do milho torna-se uma das commodities mais importantes no mercado mundial. O grão é utilizado principalmente para a alimentação humana e animal, podendo também ser usado para produção de silagem e de biocombustíveis (Duarte *et al.*, 2021).

A produção brasileira, se divide em três safras, com a primeira sendo a safra de verão com a semeadura e colheita de setembro a abril respectivamente, a segunda safra, mais conhecida como safrinha, utilizada após a colheita da soja com a semeadura e colheita de janeiro a agosto respectivamente, e por último a terceira safra, sendo o milho de inverno, com cultivo principalmente nos estados do norte e nordeste, com a semeadura e colheita de maio a novembro respectivamente. As safras de 2025/2026, está estimado a produção de 138.8 milhões de toneladas em 22.7 mil hectares, uma redução de 1,6% de produção comparado as safras de 2024/2025 que obtiveram 141.1 milhões de toneladas em 21.8 mil hectares de área cultivada (CONAB, 2025).

O Brasil se encontra como o terceiro maior produtor de milho do mundo, apenas atrás de Estados Unidos em primeiro e China em segundo, com cerca de 22,3 mil hectares de área cultivada, com valores de produtividade média de 5,83 toneladas por hectare (USDA, 2025).

Dos aspectos que podem afetar a produtividade do milho, o uso de sementes de variedades não adequadas para o ambiente e semeaduras em épocas desfavoráveis são os principais (Da Silva *et al.*, 2021). Dessa forma, torna-se essencial compreender e avaliar cada etapa do ciclo fenológico da cultura, considerando as condições ambientais que melhor favorecem cada fase de desenvolvimento. Esse entendimento permite definir, com maior precisão, o período mais adequado para a semeadura em cada região, otimizando o desempenho produtivo (Forsthofer *et al.*, 2006).

Além desses pontos, alterações nos regimes de chuvas e limitações de radiação e temperatura prejudicam a produtividade, tornando necessário considerar as condições climáticas e o solo onde está sendo cultivado, fatores essenciais para uma boa produtividade agrícola (Neto *et al.*, 2015).

3.2 Plantas de cobertura

Sistemas de cultivo monocultural, onde apenas uma cultura é utilizada está muitas vezes pode estar associada a baixa produção agrícola pela alta incidência de pragas e doenças e pela baixa fertilidade e degradação do solo. Na utilização de sistemas de consorcio com a utilização de uma ou mais espécies de plantas simultaneamente com a cultura de interesse oferece benefícios, tais como, a proteção contra processos erosivos, aumento de MOS e nutrientes no solo, aumento da atividade da macro e microbiota e melhorias na agregação, infiltração, densidade e porosidade do solo (Gassen; Gassen, 1996). A presença dessas espécies também contribui para uma maior presença de resíduos culturais que beneficia futuras safras e oferece controle eficaz contra plantas invasoras, pragas e doenças na lavoura (Macedo, 2009).

O consorcio de plantas de cobertura juntamente ao cultivo do milho vem se consolidando aos poucos, pois esta prática, além de não interferir nos aspectos de colheita do milho, também se revelou eficiente no aumento de matéria seca do solo, aumentando o teor de MOS (matéria orgânica do solo) e a ciclagem de nutrientes do solo, gerando assim, condições favoráveis para os próximos cultivos (Alvarenga *et al.*, 2006; Michelon *et al.*, 2019).

Cada uma das espécies de plantas de cobertura tem características e dinâmicas específicas quanto a produção de matéria seca presente nos resíduos culturais e nos teores de nutrientes (Michelon *et al.*, 2018). As gramíneas têm capacidade de proporcionar proteção da estrutura do solo contra agentes erosivos, conserva a umidade do solo e controla o aumento de plantas invasoras devido a alta produção de biomassa, e degradação, aumentar o teor de MO e atividade microbiana no solo (Oliveira *et al.*, 2017).

Já espécies do gênero *crotalaria* possuem desenvolvimento vegetativo rápido com altos níveis de biomassa com altos valores tanto de produção, quando de extração de nutrientes, sua espécie tem capacidade de se desenvolver em solos de baixa fertilidade em virtude ao aporte recebido pela capacidade de realizar fixação biologia de nitrogênio, o sistema radicular tem capacidade de chegar a grandes profundidades no solo, melhorando a capacidade de absorção de nutrientes (Fontanetti *et al.*, 2006; Vargas *et al.*, 2011).

Quando consorciado a cultura de interesse juntamente a uma *Poaceae* (gramínea) e uma *Fabaceae* (leguminosa), promove-se uma maior produção de massa seca e conseqüentemente uma maior cobertura do solo (Makino *et al.*, 2019). O uso de plantas de cobertura configura-se como uma prática agrônômica eficaz para otimizar a produtividade de grãos e elevar as concentrações foliares de nitrogênio nas culturas principais. Essa técnica promove maior sustentabilidade ao sistema de produção agrícola, atuando diretamente na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, por meio do incremento da matéria orgânica, da ciclagem de nutrientes e da intensificação da atividade microbiana (Galindo *et al.*, 2018).

A implementação desse sistema integrado a produção aumenta o acúmulo de nutrientes nos restos culturais, fator que leva a diminuição do uso de fertilizantes agrícolas e proporcionando maior sustentabilidade agrícola (Kumar *et al.*, 2014). A formação da palhada e a mineralização pelos microrganismos permite melhorar os atributos físicos do solo, melhorando e protegendo a estrutura, aumento de porosidade, infiltração e aeração e diminuindo a densidade e resistência do solo a penetração de raízes (Alvarez *et al.*, 2017).

3.3 Adubação nitrogenada

Dentre os macronutrientes para que as plantas completem seu ciclo, o principal e mais utilizado pelas culturas no mundo é o nitrogênio (Cunha *et al.*, 2010). O nitrogênio é essencial para a cultura do milho, sendo o nutriente mais exigido pela cultura, assim tornando necessário um manejo adequando do nutriente no solo, para que não ocorra déficit de nitrogênio na planta. Os fertilizantes mais utilizados são a base de amônio e nitrato, sendo a ureia o mais utilizado (Biancho *et al.*, 2022).

Por esses fatores, o manejo de nitrogênio no solo se torna algo complexo, sendo que a extração pelas culturas (produção esperada), histórico de uso da área e a avaliação da textura do solo para possíveis parcelamentos na quantidade a ser aplicado, pontos a serem avaliados antes de executar a adubação nitrogenada (Demattê *et al.*, 2024).

Estudos demonstram que a aplicação de teores altos de fertilizantes nitrogenados na semeadura pode acarretar diminuição do número de plantas, devido

a toxidade gerada pela grande concentração do nutriente (Portugal *et al.*, 2017). Para que a produção atinja valores maiores que 9 t/ha de produtividade, a cultura do milho necessita 185 kg/ha de N, sendo que 75% desse valor são exportados para os grãos. Aplicações de 120 a 200 kg/ha em solos arenosos com altas condições de percolação de N, devem ser parceladas sendo aplicada certa parte em cobertura (Coelho *et al.*, 2007).

Doses de nitrogênio, associadas às diferentes espécies de plantas de cobertura do solo, exerceram efeitos sobre os parâmetros morfofisiológicos do milho, refletindo em variações na altura de plantas, na altura de inserção da primeira espiga e, conseqüentemente, na produtividade de grãos (Silva *et al.*, 2006). Utilização de adubação nitrogenada agrega incremento de massa seca não só na cultura do milho, mas principalmente nas espécies usadas como cobertura no consórcio (Frota, 2023).

Pesquisas que avaliem sistemas de consorciação entre o milho safrinha e espécies de plantas de cobertura pertencentes às famílias Fabaceae e Poaceae, associadas à aplicação de diferentes doses de nitrogênio em cobertura, são fundamentais para o aprimoramento e a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Melo, 2024).

3.4 Agregados do solo

Fatores como a presença de agentes cimentantes, presença de micro, meso e macrofauna, cátions absorvidos e o manejo do solo são os com maior influência na formação de agregados do solo. A aproximação das partículas do solo com a argila, MO que é ingerida, decomposta e excretada pelos organismos do solo, e os sesquióxidos de ferro e alumínio é responsável por consolidar a união das partículas, formando o agregado e construindo a estrutura do solo (Bonini, 2012). Manejos inadequados, onde o solo fica descoberto e desprotegido, tem-se a estabilidade e resistência dos agregados reduzidas, uma vez que ocorre selamento superficial, diminuindo a infiltração de água, levando a erosão e perda de solo (Roth *et al.*, 1991).

Além da remoção de espécies vegetais que deixa o solo descoberto, muitas áreas se encontram em estado de degradação devido à alta exploração e manejo inadequado do solo. Práticas como a monocultura sem rotação de culturas, uso demasiado de fertilizantes químicos e defensivos agrícolas, atrelados a falta de

cobertura vegetal, afetam negativamente a estrutura do solo e intensificando processos de degradação (Nantes, 2024). Manejos conservacionistas e a adição de MO no solo são formas de melhorar a qualidade estrutural dos solos, trazendo benefícios não só ao aspecto físico, mas também a parte química do solo (Junior *et al.*, 2012).

A deposição de resíduos vegetais sobre a superfície do solo exerce papel fundamental na regulação térmica das camadas superficiais, promovendo maior estabilidade e redução das variações de temperatura. Além disso, a presença desse material contribui para a melhoria da estrutura do solo, favorecendo o incremento da porosidade e a maior estabilidade dos agregados, especialmente quando associada a práticas adequadas de manejo (Santos, 2022).

Diferente do sistema convencional, onde a estabilidade dos agregados é menor, por conta da alta velocidade de decomposição da matéria orgânica, sistemas de plantio direto com uso de palhada, tem menor velocidade de decomposição e maior acúmulo de MO, e aumentando o teor de C no solo, que através do efeito cimentante, aumenta a estabilidade e resistência dos agregados (Chaveiro, 2022).

Solos que apresenta boa estrutura com agregados estáveis e resistentes, tem suas capacidades de armazenamento de água aumentando, reduzindo a perda de partículas de solo pela erosão, redução das perdas de nutrientes e aumentando a proteção e acúmulo de matéria orgânica no solo (Jastrow *et al.*, 1998). Solos com baixa qualidade estrutural, caracterizados por elevada compactação e reduzida estabilidade dos agregados, apresentam maior suscetibilidade à degradação física. Essa condição compromete a dinâmica do ar e da água no perfil, afetando negativamente o desenvolvimento radicular, a produtividade e a qualidade das culturas agrícolas (Jia *et al.*, 2020).

A utilização de plantas de cobertura à sucessão de culturas proporcionou melhorias na estrutura do solo, aumentando a resistência de agregados e com sigo, maior porosidade, menor densidade e menor resistência a penetração de raízes no solo (Bonini, 2012). A adoção de consorcio com plantas de cobertura, constitui uma prática agrônômica de elevada eficiência, capaz de promover o aumento da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, aprimorar suas propriedades físicas. Além disso, essa estratégia contribui indiretamente para a otimização da produtividade das culturas, em virtude da melhoria da estrutura e da funcionalidade do solo no sistema produtivo (Galindo *et al.*, 2018).

3.5 Porosidade e densidade do solo

A disposição da estrutura do solo, se encontra dividida entre 50% de sólidos (fração mineral e MO) e 50% de espaços vazios, responsáveis pelo armazenamento e passagem da solução do solo, água e ar, juntos, formam o volume total do solo. A parte do solo responsável pelo armazenamento de água e ar, é denominado espaço poroso, representando a proporção entre o espaço poroso para armazenamento e o volume total do solo, valor esse que é inversamente proporcional a densidade do solo, quanto maior a porosidade, menor é a densidade do solo (Zemolin, 2017).

A porosidade total é dividida entre macroporos, responsáveis aeração e os microporos responsáveis pelo armazenamento de água. A distribuição dos poros para um solo ideal é de 2/3 da porosidade total do solo para microporos, 1/3 destes poros de macroporos (Santos, 2022). Entretanto, em solos de textura arenosa, observa-se comportamento inverso, caracterizado por maior proporção de macroporos e, conseqüentemente, maior aeração em comparação aos solos de textura argilosa (Demattê *et al.*, 2024).

A porosidade do solo pode ser classificada em intra-agregados e inter-agregados. A porosidade intra-agregados corresponde à microporosidade, representando os espaços existentes entre as partículas primárias do solo, enquanto a porosidade inter-agregados está relacionada ao arranjo e à organização dos microagregados, sendo fortemente influenciada pelas práticas de manejo adotadas (Ingaramo, 2003).

Solos em possíveis processos de degradação, com fragilidades estruturais, tendem a ter modificações em sua estrutura, provocando diminuição do tamanho de poros maiores (macroporos) e formação de microporos, afetando o fluxo de água e influenciando na taxa de infiltração. Como os valores de porosidade total, é o valor da soma de macroporos com microporos, faz com que não seja possível afirmar que valores altos de porosidade total, indicam valores satisfatórios e adequados de qualidade do solo, tornando importante conhecer a distribuição dos poros totais (Bonini *et al.*, 2017; Bonini, 2010).

A macroporosidade do solo é considerada adequada quando apresenta valores iguais ou superiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Valores inferiores a esse limite são classificados

como críticos, comprometendo o desenvolvimento e a funcionalidade do sistema radicular das plantas (Greenland, 1981).

Quando determinado a massa e volume do solo em relação ao espaço de vazios presente no mesmo, determinamos o valor da densidade do solo, valor que pode variar em detrimento o arranjo das partículas do solo. Valores de densidade variam do mesmo tipo de solo em detrimento ao manejo e estruturação do solo, causando possíveis compactações (Bonini, 2010). A compactação é um grave problemas, em solos degradados, pois influencia negativamente no crescimento das plantas e na sobrevivência da fauna do solo (Kitamura, 2007).

Efeitos gerados pela presença de plantas, que através de suas raízes, provocam mudanças na macroporosidade do solo, alterando o volume e a distribuição dos poros e reduzindo sua densidade (Teixeira *et al.*, 1997). A aplicação de MO nas suas diferentes formas ajuda a reduzir valores de densidade do solo (Kiehl, 1979). A presença de matéria orgânica no solo aumenta a macroporosidade, a retenção de água e diminuindo a densidade (Carvalho, 1998).

A densidade do solo constitui um dos principais indicadores utilizados para a caracterização de sua estrutura física, sendo amplamente empregada na estimativa dos estoques de carbono e de outros componentes do sistema edáfico. A elevação da densidade, decorrente da redução da macroporosidade em função da compactação, compromete o desenvolvimento radicular, limitando o crescimento das raízes principais de maior diâmetro e induzindo o aumento da proporção de raízes laterais mais finas, capazes de penetrar poros menores. Essa alteração na arquitetura radicular resulta em restrições ao crescimento e ao desenvolvimento geral das plantas (Santos, 2022).

A densidade do solo apresenta estreita relação com sua resistência à penetração radicular (Silva *et al.*, 2003). O aumento dessa resistência está associado à intensificação da compactação, a qual eleva a densidade e reduz o volume total de poros, limitando, assim, o crescimento e a exploração do perfil do solo pelas raízes (Tormena *et al.*, 2002).

Como a densidade do solo pode variar para solos com diferentes texturas, para solos arenosos, valores maiores que $1,5 \text{ g/cm}^3$ são mais comuns e estão dentro dos padrões, mas valores maiores que $1,75 \text{ g/cm}^3$ causam interferência no desenvolvimento de raízes (Demattê *et al.*, 2024; Reichert *et al.*, 2003).

3.6 Textura do solo

Das características que são intrínsecas aos solos, referentes ao processo de pedogênese, e que não são afetadas ou modificadas pelo manejo, estão a densidade de partícula e a textura do solo. Mas o conhecimento dos valores desses atributos é de suma importância para realizar de forma adequada a caracterização do solo, visto que esses atributos interferem diretamente nas propriedades físicas do solo, como densidade, porosidade e na formação e estabilidade de agregados (Santos, 2022).

A textura do solo, especialmente em solos com maior teor de argila, exerce papel fundamental na proteção da matéria orgânica, promovendo sua estabilização nos complexos coloidais. A matéria orgânica, por sua vez, atua como agente estruturante, contribuindo para a recuperação e a melhoria dos atributos físicos do solo, tais como densidade, porosidade, estabilidade de agregados e capacidade de infiltração de água (Bonetti *et al.*, 2017). solos de textura mais argilosos sempre apresentam maior teor de MO do que os arenosos (Demattê *et al.*, 2024).

O armazenamento e a retenção de água no solo estão intrinsecamente associados à sua textura. Solos com maior proporção de argila apresentam predominância de microporos, os quais desempenham papel essencial na retenção e disponibilização de água para as plantas, conferindo maior capacidade de armazenamento hídrico ao sistema edáfico (Costa, 2010).

A textura do solo, por representar a proporção relativa de seus constituintes minerais (areia, silte e argila) constitui uma propriedade essencial para a caracterização do solo. Por se tratar de um atributo pouco suscetível às alterações decorrentes do manejo, sua avaliação é fundamental para estudos de classificação, manejo e interpretação das propriedades físicas e químicas do solo (Gavande, 1976).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área experimental

A pesquisa foi realizada em condições de campo, na área experimental da FCAT/Unesp – Dracena, situada às coordenadas geográficas 21°29' S e 51°52' W, a 420 metros de altitude. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico típico de textura arenosa, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2025). O clima, segundo a classificação Köpen é Cwa (subtropical úmido), com verão quente e chuvoso de outubro a março e inverno seco e ameno de baixa precipitação pluvial de abril a setembro. As médias anuais: temperatura 24°C e umidade relativa de 64,23%, a precipitação pluvial média anual é de 1.261 mm.

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4 × 4, sendo os tratamentos compostos pelo cultivo de milho (*Zea mays* L.) em monocultivo e em consórcio (*Crotalaria spectabilis*, *Urochloa ruziziensis* e um consórcio entre ambas), associado à aplicação de quatro doses de ureia (46% de N): 0, 40, 80 e 120 kg/ha⁻¹. Sendo 50% da dose aplicada no estágio fenológico V5 e os outros 50% no estágio de V8. Foram utilizados 2,5 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis de *U. ruziziensis* e 2,0 kg ha⁻¹ de *C. spectabilis*. As espécies de cobertura foram semeadas a 0,03 m de profundidade.

Antes da instalação dos experimentos foi realizada uma caracterização química do solo em toda área de pesquisa. O preparo convencional do solo foi composto por uma aração profunda e duas operações com grade leve.

A ureia foi aplicada superficialmente, posicionada a aproximadamente 0,05 m lateralmente às linhas de milho, sem incorporação mecânica ao solo. Após a adubação nitrogenada em cobertura, realizou-se a irrigação da área com uma lâmina de 10 mm, com o propósito de reduzir as perdas de nitrogênio por volatilização.

A semeadura do milho solteiro e em consórcio foi realizada usando o espaçamento de 0,90m entre linhas, com um total de 60 mil plantas por hectare. As plantas de cobertura foram semeadas de forma manual e distribuídas em uma única fileira entre as linhas do milho. Foi usado o híbrido simples de ciclo precoce MG593PWU da empresa MORGAN, recomendado e adaptado para a região na segunda safra.

As parcelas de milho, conduzidas tanto em cultivo solteiro quanto em consórcio com culturas de cobertura, foram compostas por quatro linhas de 5 m de comprimento. A área útil para avaliação correspondeu às duas linhas centrais, descontando-se 0,5 m nas extremidades de cada parcela para evitar efeitos de bordadura.

O manejo da irrigação foi conduzido a partir da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), calculada pelo método de Penman-Monteith/FAO. As variáveis meteorológicas necessárias para o cálculo foram obtidas na estação Meteorológica Campbell Scientific CR10X, instalada na Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT) da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

O sistema de irrigação utilizado consistiu em um conjunto de aspersão convencional com eficiência operacional de 80%. O modelo de aspersor empregado foi o Agropolo NY25, equipado com bocais de 2,8 × 2,5 mm. A instalação foi composta por duas linhas, cada uma contendo oito aspersores, espaçados a 12 m tanto entre si quanto entre as linhas, garantindo adequada uniformidade de aplicação. O sistema operou com uma lâmina líquida de 4,9 mm h⁻¹ sob pressão de serviço de 2,5 kgf cm⁻². Os intervalos de irrigação foram ajustados adotando-se um turno de rega fixo de quatro dias.

4.2 Avaliações realizadas

As amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas no período de abril a maio de 2023, após ser realizada a colheita do milho. As profundidades das camadas de solo coletadas foram de 0-0,10 e 0,10-0,20 m no centro de cada parcela experimental, coletadas em três dos quatro blocos experimentais, totalizando 96 amostras.

As avaliações do solo foram: Porosidade (Macro, micro e porosidade total), densidade, distribuição e estabilidade de agregados e textura do solo.

4.3 Análise estatística

Para a análise de estatística, os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) pelo teste F, utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação das medias com auxílio do programa estatístico SISVAR® (FERREIRA, 2011).

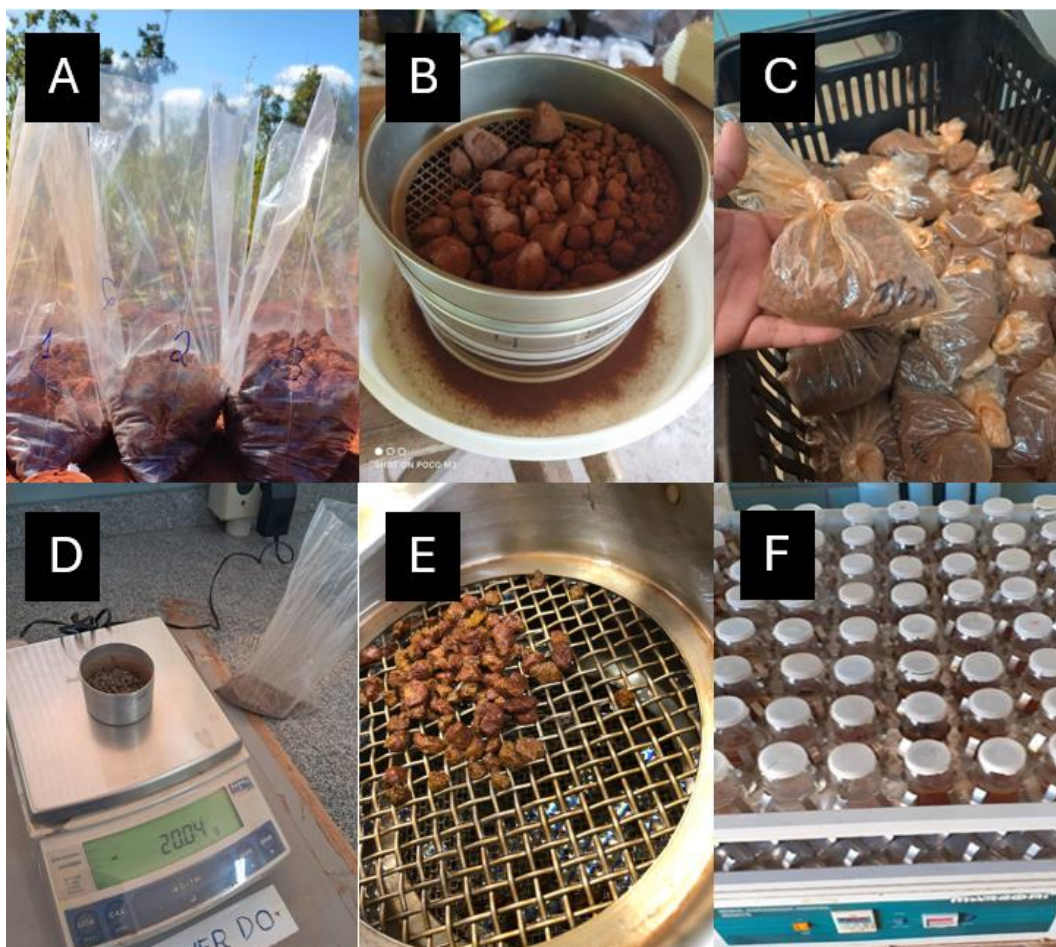
4.4 Estabilidade de agregados em água

A distribuição e estabilidade de agregados em água, diâmetro médio ponderado dos agregados foi determinado pelo método de Angers e Mehuys (2000). As amostras foram submetidas a análise, em sequência, foram realizados os cálculos conforme a equação abaixo:

$$DMP_u = \sum (X_{iu} * W_{iu})$$

Onde: **DMP_u** - Diâmetro médio ponderado, por via úmida, em mm. **X_{iu}** - Diâmetro médio de cada classe, por via úmida, em mm. **W_{iu}** - Proporção de agregados em cada classe/peneira (i), por via úmida, em %.

Figura 1: Análise da estabilidade de agregados em água



Fonte: elaborado pelo autor

Legenda: A) Coleta das amostras; B) Separação dos agregados (4mm); C) armazenamento dos agregados; D) Pesagem das amostras para peneiramento; E) Peneiramento úmido das amostras; F) amostras para análise de agregados úmidos em agitação.

4.5 Porosidade e densidade do solo

O valor total de poros do solo é obtido pela completa saturação da amostra (todos os poros ocupados por água), a microporosidade pelo método da mesa de tensão com coluna de água com 0,60m, e a macroporosidade através da diferença entre a porosidade total e a microporosidade (Teixeira *et al.*, 2017). Já a densidade foi determinada pelo método do anel volumétrico (Teixeira *et al.*, 2017). As amostras foram submetidas a análise, em sequência, o cálculo da porosidade e densidade do solo, conforme as equações abaixo:

$$P_t = \frac{[(a - b) - (c - d)]}{e}$$

Onde: **P_t** – Porosidade total, em m³ m⁻³ **a** – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga saturado, em kg. **b** – Massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga seco a 105 °C, em kg. **c** – Massa do conjunto cilindro-tecido-liga saturado, em kg. **d** – Massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a 105 °C, em kg. **e** – Volume total da amostra, em cm³

$$M_i = \frac{(a - b)}{c}$$

Onde: **M_i** – Microporosidade, em m³ m⁻³. **a** – Massa do solo seco + água retida, após equilíbrio com um potencial de 6 kPa (60 cm de coluna de água), em g. **b** – Massa do solo seco a 105 °C, em g. **c** – Volume total da amostra, em cm³.

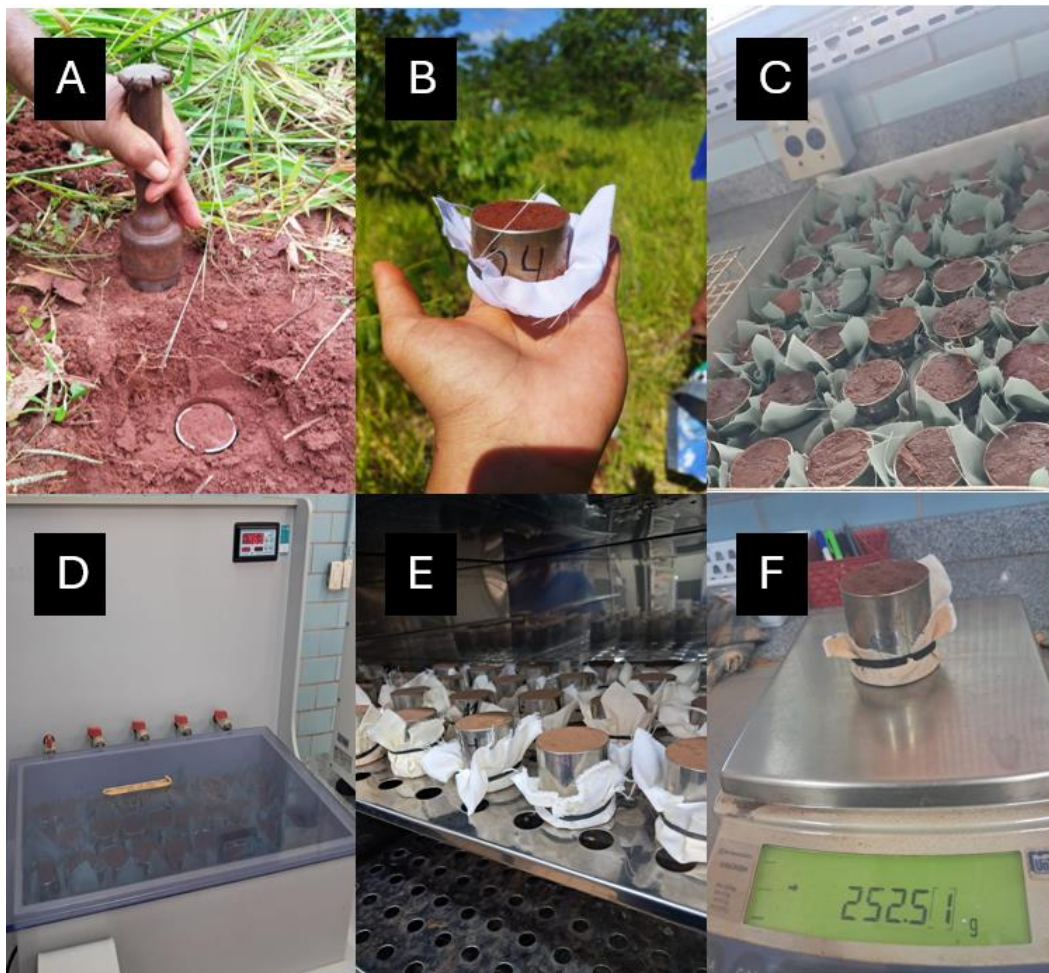
$$M_a = (P_t - M_i)$$

Onde: **M_a** – Macroporosidade, em m³ m⁻³. **P_t** – Porosidade total, em m³ m⁻³. **M_i** – Microporosidade, em m³ m⁻³

$$D_s = \frac{M_a}{V}$$

Onde: **Ds** – Densidade do solo, em g/cm^{-3} (equivalente a g cm^{-3}); **ma** – Massa da amostra de solo seco a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ até peso constante, em g; **V** – Volume do cilindro, em cm^3 .

Figura 2: Análise de porosidade e densidade do solo



Fonte: elaborado pelo autor

Legenda: A) Coleta do anel volumétrico; B) Anel volumétrico coletado e preparado; C) Saturação das amostras; D) Amostras na mesa de tensão; E) Amostras depois 24 horas na estufa; F) pesagem das amostras secas.

4.6 Análise de textura do solo

A análise foi realizada seguindo o método da pipeta (Teixeira *et al.*, 2017), avaliando as quantidades de partículas sólidas (argila, areia e silte) nas amostras de solo. As amostras foram submetidas a análise, em sequência, foram realizados os cálculos conforme as equações abaixo:

$$S_m = \left(\frac{M_{af} * f}{M_i} \right) + \left(\frac{(M_{at} - M_{af}) * f}{M_i} \right) + \left(\frac{(M_{sa} - M_{ar}) * f}{M_i * R_v} \right) + \left(\frac{(M_{ar} - M_{br}) * f}{M_i * R_v} \right)$$

Onde: **S_m** – Somatório das massas das frações, em g. **maf** – Massa de areia fina, em g. **mat** – Massa de areia total, em g. **msa** – Massa de silte + argila, seca em estufa, em g. **mar** – Massa de argila, seca em estufa, em g. **mbr** – Massa do controle, seca em estufa, em g. **mi** – Massa inicial da amostra, em g. **R_v** – Razão do volume pipetado para o volume total da proveta. **f** – Fator de correção de umidade para a massa inicial.

$$T_{af} = \left(\frac{M_{af} * f}{M_i} \right) * \left(\frac{1000}{S_m} \right)$$

Onde: **T_{af}** – Concentração de areia fina, em g kg⁻¹. **mi** – Massa inicial da amostra, em g. **maf** – Massa de areia fina, em g. **f** – Fator de correção de umidade para a massa inicial. **S_m** – Somatório das massas das frações, em g.

$$T_{ag} = \left(\frac{(M_{at} - M_{af}) * f}{M_i} \right) * \left(\frac{1000}{S_m} \right)$$

Onde: **T_{ag}** – Concentração de areia grossa, em g kg⁻¹. **mi** – Massa inicial da amostra, em g. **mat** – Massa de areia total, em g. **maf** – Massa de areia fina, em g. **f** – Fator de correção de umidade para a massa inicial. **S_m** – Somatório das massas das frações, em g.

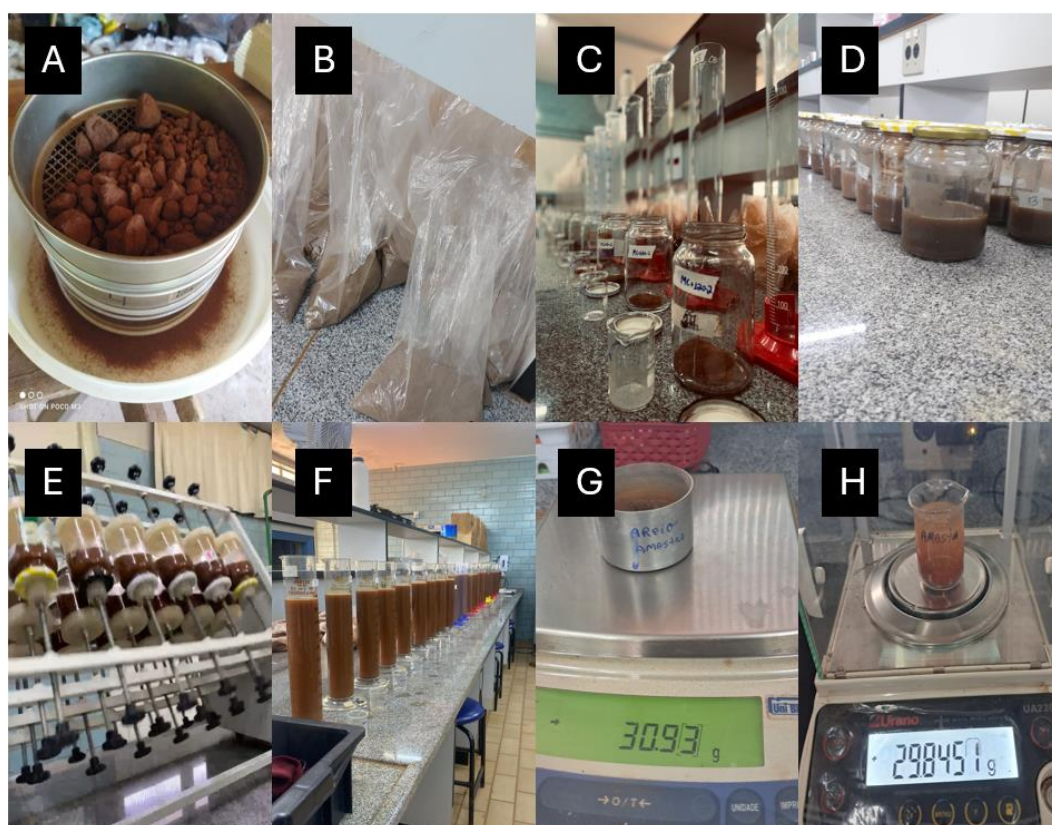
$$T_s = \left(\frac{(M_{sa} - M_{ar}) * f}{M_i * R_v} \right) * \left(\frac{1000}{S_m} \right)$$

Onde: **T_s** – Concentração de silte, em g kg⁻¹. **mi** – Massa inicial da amostra, em g. **msa** – Massa de silte + argila, seca em estufa, em g. **mar** – Massa de argila, seca em estufa, em g. **R_v** – Razão do volume pipetado para o volume total da proveta. **f** – Fator de correção de umidade para a massa inicial. **S_m** – Somatório das massas das frações, em g.

$$T_{arg} = \left(\frac{(M_{ar} - M_{br}) * f}{M_i * R_v} \right) * \left(\frac{1000}{S_m} \right)$$

Onde: **Targ** – Concentração de argila, em g kg⁻¹. **mi** – Massa inicial da amostra, em g. **mar** – Massa de argila, seca em estufa, em g. **mbr** – Massa do branco, seca em estufa, em g. **Rv** – Razão do volume pipetado para o volume total da proveta descontado o volume retirado na primeira pipetagem. **f** – Fator de correção de umidade para a massa inicial. **Sm** – Somatório das massas das frações, em g.

Figura 3: Análise de textura do solo



Fonte: elaborado pelo autor

Legenda: A) Peneiramento para obter a terra fina seca ao ar (<2mm); B) Armazenamento das amostras da TFSA; C) 20 gramas da amostra pesada e potes numerados; D) Amostra diluída no agente dispersante; E) Agitação vertical das amostras; F) Separação das frações minerais e sedimentação da argila; G) Pesagem da fração areia; H) Pesagem da Fração argila

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estabilidade de agregados em água

Tabela 1: Valores do teste F, CV (%) e valores médios do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro das peneiras de 4; 2; 1; 0,5; 0,25 e < 0,25 mm, dos tratamentos estudados nas camadas de solos (0-0,10; 0,10-0,20m), Dracena -SP, maio de 2023.

0,00-0,10 m							
	DMP	D4**	D2	D1**	D0,5**	D0,25	Dm0,25
F _{trat(t)}	34,88*	68,65*	18,96*	0,05 ^{ns}	5,31*	10,89*	8,14*
F _{doses(d)}	6,50*	22,62*	0,87 ^{ns}	4,00 ^{ns}	1,41 ^{ns}	2,72 ^{ns}	2,42 ^{ns}
F _{t x d}	12,11*	31,76*	22,12*	6,17*	18,01*	8,71*	30,17*
CV1(%)	8,27	4,46	6,10	9,94	10,44	10,02	7,12
CV2(%)	14,66	9,87	4,79	12,32	8,77	12,90	6,80
Médias dos tratamentos							
M	1,04b	6,71c	13,76b	5,34a	10,55a	20,09a	43,54ab
MC	1,27a	8,54b	17,40a	5,36a	10,53a	17,53ab	40,62b
MU	1,31a	10,22a	16,90a	5,70a	7,99b	16,00b	43,17ab
MUC	0,99b	7,28c	13,58b	5,41a	9,26ab	18,61a	46,84a
0,10-0,20 m							
	DMP	D4**	D2**	D1**	D0,5	D0,25**	Dm0,25
F _{trat(t)}	3,84 ^{ns}	18,63 ^{ns}	4,95*	5,44*	27,54*	3,07 ^{ns}	15,14*
F _{doses(d)}	9,30*	2,02*	13,33*	8,61*	2,99 ^{ns}	5,77*	22,38*
F _{t x d}	25,83*	65,47*	11,01*	8,31*	28,98*	15,63*	27,78*
CV1(%)	13,43	8,38	8,10	13,37	14,40	8,84	5,74
CV2(%)	11,56	10,62	6,34	10,74	9,71	5,83	4,81
Médias dos tratamentos							
M	0,98a	2,09b	11,22b	7,62a	16,20a	18,20a	41,40c
MC	0,90a	2,03b	12,58ab	5,65ab	11,04b	21,69a	44,49b
MU	1,03a	2,47a	14,18a	5,06ab	11,30b	20,23a	42,66bc
MUC	0,88a	1,97b	12,18ab	4,91b	10,41b	18,90a	47,95a

M: Milho (*Zea mays*); MC: Milho + *Crotalaria spectabilis*; MU: Milho + *Urochloa ruziziensis*; MUC: Milho + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*. NOTA: *significativo a 5% de probabilidade e NS não significativo. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tratamentos que utilizaram o cultivo de milho em consórcio com plantas de cobertura apresentaram valores de diâmetro médio ponderado dos agregados superiores aos observados no cultivo de milho solteiro, com destaque para o consórcio milho + *crotalária* (Tabela 2).

Tabela 2: Valores da interação do tratamento pelas doses de ureia para o diâmetro médio ponderado (DMP) para a profundidade de 0,00–0,10 e 0,10-0,20m, Dracena -SP, maio de 2023

	M	MC	MU	MUC
DMP (mm) – 0,0-0,10 m				
0	0,73bC	1,40aB	1,44aA	0,83bC
40	1,06bA	1,33aB	1,30aB	0,74cC
80	0,90cB	1,75aA	1,25bB	1,08cB
120	1,02bA	1,28aB	0,90bC	1,32aA
	M	MC	MU	MUC
DMP (mm) – 0,10-0,20 m				
0	0,74bC	1,17aB	1,26aA	0,79bB
40	0,73bB	1,07aB	0,93aB	0,79bB
80	0,76cB	1,42aA	1,29bA	0,72cB
120	0,94aA	0,81aC	0,75aB	0,96aA

M: Milho (*Zea mays*); MC: Milho + *Crotalaria spectabilis*; MU: Milho + *Urochloa ruziziensis*; MUC: Milho + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*; médias seguidas de mesma letra, minúscula nas linhas e maiúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de tukey a 5 % de significância. Fonte: Elaborado pelo autor.

A presença de matéria seca no solo contribui de forma significativa para o aumento da proporção de agregados. A palha atua no controle das variações de umidade, preservando a estrutura e a estabilidade do solo (Grant *et al.*, 1990). Além disso, a cobertura superficial reduz o impacto direto das gotas de chuva, promove rugosidade hidráulica, diminui as perdas por escorrimento e mitiga o processo de desagregação, favorecendo a formação e a resistência dos agregados (Santos, 2022).

Os resíduos culturais em contato com o solo são gradualmente transformados em matéria orgânica do solo (MOS) humificada, que interage com a fração mineral, originando compostos organominerais (Roscoe *et al.*, 2006). As interações físico-químicas, como as ligações argilo-metal-húmicas, promovem a formação de

microagregados (Santos, 2022), que, ao se unirem, resultam na constituição dos macroagregados (Roscoe *et al.*, 2006). A manutenção de condições estruturais ideais é um fator importante para o crescimento da cultura, solos desestruturados apresentam déficits no armazenamento de água e na aeração, causando restrição no crescimento das raízes, formando raízes curtas e grossas, interferindo na eficiência da utilização de água e nutrientes pela planta (Almendro-Candel., *et al* 2018).

Os melhores resultados para o diâmetro médio ponderado dos agregados, em ambas as profundidades avaliadas, foram obtidos no tratamento milho + *crotalária* com as doses de 0, 40 e 80 kg/ha de ureia. Nesses tratamentos, a produtividade de matéria seca da parte aérea ultrapassou 19.000 kg/ha, associada a valores de acúmulo de nitrogênio nos resíduos superiores a 300 kg/ha (Tabela 3).

Tabela 3: Desdobramento da interação significativa da análise de variância referente a produtividade de matéria seca e acúmulo de nitrogênio (N) da parte aérea dos resíduos culturais

	M	MC	MU	MUC
Produtividade de matéria seca da parte aérea dos resíduos culturais (kg/ha)				
0	18,805 b	19,614 b	24,477 a	21,495 ab
40	12,341 b	22,104 a	19,341 a	21,644 a
80	15,812 b	21,026 a	21,673 a	22,326 a
120	11,985 b	14,251 b	14,152 b	18,616 a
	M	MC	MU	MUC
Acúmulo de N da parte aérea dos resíduos culturais (kg/ha)				
0	237,0 b	314,3 a	205,7 b	188,6 b
40	140,9 c	407,5 a	277,5 b	169,8 c
80	127,7 c	329,9 a	275,4 ab	223,2 b
120	225,9 a	258,9 a	223,2 a	252,0 a

M: Milho (*Zea mays*); MC: Milho + *Crotalaria spectabilis*; MU: Milho + *Urochloa ruziziensis*; MUC: Milho + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*; médias seguidas de mesma letra, minúscula nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de tukey a 5 % de significância.

Fonte: Mikaelle Eduarda Rocha Frota, (2023)

A *crotalária* apresenta crescimento inicial lento, o que não compromete o acúmulo de matéria seca do milho (Alvarenga *et al.*, 2006). Além disso, destaca-se pela alta produção de biomassa, pela adaptação a solos de baixa fertilidade e, por pertencer à família *Fabaceae*, pela baixa relação C/N. Essas características

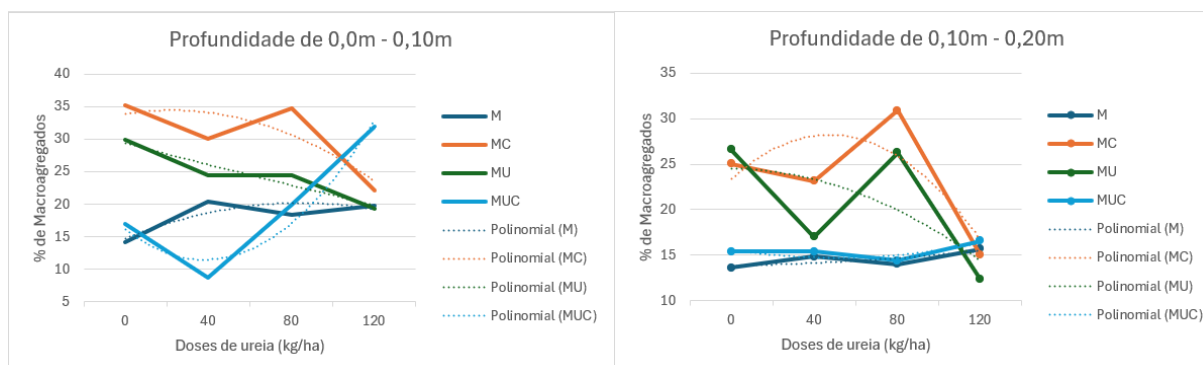
favorecem a rápida liberação de nutrientes e a fixação biológica de nitrogênio (Barbosa *et al.*, 2020).

No consórcio milho + *Urochloa*, os maiores valores de diâmetro médio ponderado (DMP) foram registrados nas doses de 0, 40 e 80 kg/ha de ureia, em ambas as profundidades (Tabela 2). Embora o acúmulo de nitrogênio nos resíduos tenha sido relativamente baixo, com valores inferiores a 280 kg/ha, esse tratamento apresentou a maior produção de matéria seca da parte aérea, superando 19.000 kg/ha nas mesmas doses de ureia (Tabela 3). Esse resultado pode ser atribuído ao profundo sistema radicular da *Urochloa*, que pode alcançar até 2 metros, aliado à sua elevada capacidade de produção de massa seca, frequentemente superior a 20 t/ha (Freitas *et al.*, 2013). Os valores foram ligeiramente superiores ao cultivo de milho solteiro, mas inferiores ao tratamento de milho + crotalária.

Para o tratamento com o “mix” de culturas, efeitos positivos foram observados apenas na dose de 120 kg/ha de ureia, na profundidade de 0,0-0,10 m. Nessa dose, o consórcio milho + crotalária + *Urochloa* apresentou os maiores valores de produção de matéria seca e de acúmulo de nitrogênio nos resíduos culturais (Tabela 3). Sanderson e Elwinger (2002) concluíram que no consórcio de gramíneas e leguminosas, deve-se focar no controle da altura das gramíneas para assim evitar competição por luz com as leguminosas, essa competição por luz e nutrientes pode ser o motivo do “mix” apenas ter gerado resposta na dose mais alta de ureia.

Os tratamentos que obtiveram os melhores resultados na porcentagem de macroagregados, são respectivamente os mesmos que obtiveram os melhores valores de DMP. Com destaque principal para o consórcio de milho + *crotalária*, nas doses de 0, 40 e 80 kg/há, onde possuem os maiores valores de macroagregados (Figura 4).

Figura 4: Porcentagem de macroagregados dos tratamentos pelas doses de ureia nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20, Dracena -SP, maio de 2023



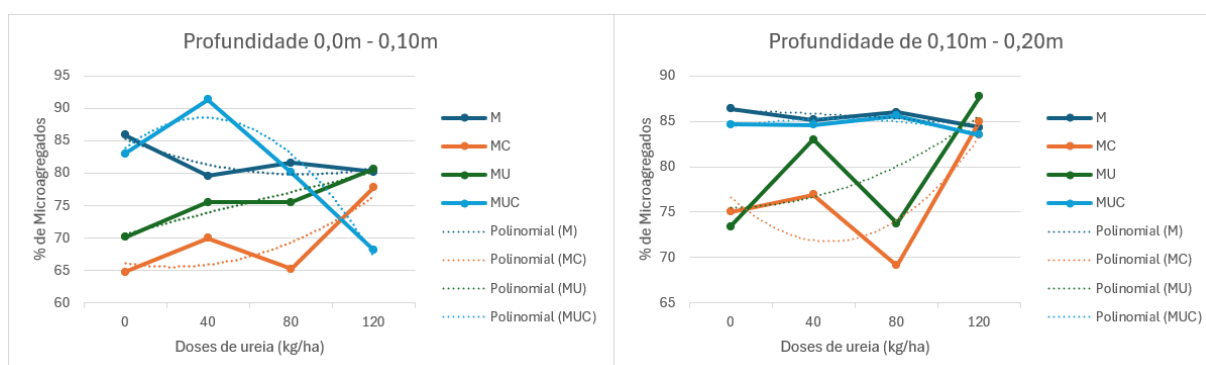
M: Milho (*Zea mays*); MC: Milho + *Crotalaria spectabilis*; MU: Milho + *Urochloa ruziziensis*; MUC: Milho + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*. Profundidade 0,0m – 0,10m: M: $y = -1,2275x^2 + 7,6365x + 8,2975$ ($R^2 = 0,7081$); MC: $y = -1,845x^2 + 5,781x + 29,925$ ($R^2 = 0,6605$); MU: $y = 0,055x^2 - 3,449x + 32,76$ ($R^2 = 0,8983$); MUC: $y = 5,1075x^2 - 19,939x + 30,908$ ($R^2 = 0,9362$). Profundidade 0,10m – 0,20m: M: $y = 0,1175x^2 - 0,0445x + 13,762$ ($R^2 = 0,6006$); MC: $y = -3,5x^2 + 15,28x + 11,56$ ($R^2 = 0,569$); MU: $y = -1,0875x^2 + 2,0685x + 23,533$ ($R^2 = 0,4093$); MUC: $y = 0,535x^2 - 2,425x + 17,47$ ($R^2 = 0,623$). Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores do diâmetro médio ponderado estão intrinsecamente ligados a porcentagem de agregados de maior diâmetro (4 e 2 mm), pois quanto maior for o agregado, maior é o espaço gerado entre as partículas, aumentando aeração, taxa de infiltração e reduzindo os riscos de erosão hídrica e escoamento superficial do solo (Matos, 2022). A desaceleração da entrada de água e o aumento da resistência dos agregados, responsáveis pela diminuição da desagregação e o aumento da quantidade de macroagregados também é muito atribuída a MOS humificada presente no solo provida pelos resíduos culturais, que protege a camada superficial do solo protegendo contra a erosão e favorece a agregação das partículas minerais (Silva; Mendonça, 2007).

Características de um solo com maiores quantidades de macroagregados, é o aumento do número de macroporos e reduzindo número de poros menores (Athmann *et al.*, 2017, Banfield *et al.*, 2018). São formados poros entre os macroagregados, graças aos movimentos da macrofauna, penetração das raízes das plantas e pela mudança de temperatura e umidade do solo (Pires *et al.*, 2017). Dentro dos macroagregados, são formados poros de tamanho e formas determinadas pelo tipo morfológico e do formato estrutural do macroagregado (Yudina *et al.*, 2022).

Conseqüentemente, com o aumento da porcentagem de macroagregados no tratamento de milho + *crotalária*, eles tiveram as maiores mudanças na porcentagem de microagregados, os valores de micro foram alterados e diminuídos no tratamento (Figura 5).

Figura 5: Porcentagem de microagregados dos tratamentos pelas doses de ureia nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20, Dracena -SP, maio de 2023



M: Milho (*Zea mays*); MC: Milho + *Crotalaria spectabilis*; MU: Milho + *Urochloa ruziziensis*; MUC: Milho + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*. Profundidade 0,0m – 0,10m: M: $y = 1,2275x^2 - 7,6365x + 91,702$ ($R^2 = 0,7081$); MC: $y = 1,845x^2 - 5,781x + 70,075$ ($R^2 = 0,6605$); MU: $y = -0,055x^2 + 3,449x + 67,24$ ($R^2 = 0,8983$); MUC: $y = -5,1075x^2 + 19,938x + 69,093$ ($R^2 = 0,9362$). Profundidade 0,10m – 0,20m: M: $y = -0,1175x^2 + 0,0445x + 86,237$ ($R^2 = 0,6006$); MC: $y = 3,5x^2 - 15,28x + 88,44$ ($R^2 = 0,569$); MU: $y = 1,0875x^2 - 2,0685x + 76,467$ ($R^2 = 0,4093$); MUC: $y = -0,535x^2 + 2,425x + 82,53$ ($R^2 = 0,623$). Fonte: Elaborado pelo autor.

Aglomerados de microagregados, formam a microestrutura do solo, que por conta das altas forças físico-químicas que as unem, tornam essa microestrutura mais resistentes aos processos de intemperismo, comparados com os macroagregados. As variações das porções de microagregados do solo esta intrinsecamente ligada a textura do solo, conseqüentemente, quanto mais argiloso o solo, maior o valor dos mesmos, e automaticamente, maior quantidade de microporos do solo e maior armazenamento de água (Dal Ferro *et al.*, 2014, Kravchenko *et al.*, 2021). Solos expostos e com pouca matéria orgânica aplicada em superfície são mais propensos a decomposição dos agregados, e a diminuição da estrutura pode diminuir a taxa de infiltração, aumentar a erosão e a perda de solo superficial (Almendo-CAndel *et al.*, 2018).

5.2 Porosidade e densidade do solo

Tabela 4: Valores do teste F, CV (%) e médios de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi); porosidade total do solo (PT) e densidade do solo (DS) dos tratamentos estudados nas camadas de solos (0,00-0,10; 0,10-0,20m), Dracena -SP, maio de 2023.

	MA** (m ³ m ⁻³)	MI**(m ³ m ⁻³)	PT (m ³ m ⁻³)	DS (g/cm ⁻³)
0,00 – 0,10 m				
F _{trat(t)}	4,02 ^{ns}	5,30 ^{ns}	0,52 ^{ns}	2,32 ^{ns}
F _{doses (d)}	7,31*	7,00*	1,05 ^{ns}	4,09 ^{ns}
F _{t x d}	3,97*	15,79*	1,71 ^{ns}	10,04*
CV1(%)	11,95	9,90	6,16	1,47
CV2(%)	10,09	5,52	7,93	1,61
Médias dos tratamentos				
M	0,14a	0,19a	0,34a	1,59a
MC	0,17a	0,17a	0,33a	1,61a
UM	0,12a	0,20a	0,33a	1,60a
MUC	0,16a	0,20a	0,33a	1,61a
0,10 – 0,20 m				
	MA** (m ³ .m ³)	MI (m ³ .m ³)	PT (m ³ .m ³)	DS (g/cm ³)
F _{trat(t)}	1,17 ^{ns}	3,13 ^{ns}	1,74 ^{ns}	1,90 ^{ns}
F _{doses (d)}	12,94*	44,15*	0,24 ^{ns}	2,87 ^{ns}
F _{t x d}	8,25*	6,79*	4,98*	3,36*
CV1(%)	10,79	9,19	8,99	3,65
CV2(%)	7,61	11,18	5,98	2,68
Médias dos tratamentos				
M	0,14a	0,18a	0,32a	1,65a
MC	0,16a	0,19a	0,34a	1,65a
UM	0,13a	0,20a	0,34a	1,60a
MUC	0,15a	0,20a	0,35a	1,63a

M: Milho (*Zea mays*); MC: Milho + *Crotalaria spectabilis*; MU: Milho + *Urochloa ruziziensis*; MUC: Milho + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*. NOTA: *significativo a 5% de probabilidade e NS não significativo. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Fonte: Elaborado pelo autor.

A disposição de um solo pode ser dada pela divisão de 50% sendo fase sólida, incluindo a matéria orgânica, e 50% de espaços vazios, sendo para um solo ideal a divisão de 2/3 dos vazios para a microporosidade e 1/3 para a macroporosidade (Kiehl, 1979). Entretanto, para solos de textura arenosa, esses valores podem ser contrários, apresentando um aumento na quantidade de macroporos, apresentando assim, maior aeração que em solos argilosos (Demattê *et al.*, 2024).

Presença de plantas e suas raízes, influenciam significativamente na formação da estrutura porosa do solo, por meio da criação, exploração e ocupação desses espaços (Lu *et al.*, 2020, Xiao *et al.*, 2024). Em processo de decomposição radicular são formados maior número de macroporos, que por sua vez gera uma adição de MO ao solo melhorando a estrutura dos agregados (Liu *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2021). Gramíneas por exemplo, possuem também grande capacidade de produção de palha com baixa velocidade de degradação graças a sua alta relação C/N (Pedreira *et al.*, 2020). A taxa de decomposição de raízes de gramíneas é mais acelerada, graças ao seu menor diâmetro, o que aumenta a formação de macroporos (Mattos, 2022). Já as leguminosas além de fixar N no solo quando consorciadas com gramíneas tem sua decomposição de forma mais lenta contribuindo para o acúmulo de matéria seca (Aita *et al.*, 2003).

Solos em possível estados de degradação e desestruturação, podem apresentar aumento da sua densidade e diminuição da sua macroporosidade (Alves, 2001). Processo de agregação e desagregação esta intrinsecamente ligada ao movimento de gases e água no solo, pois influencia diretamente nas características e proporções dos poros no solo (Marland *et al.*, 2004; Beare *et al.*, 2009). Em seu trabalho, Mangalassery *et al.* (2013) comprovou que colunas de solo, com agregados maiores favoreceram a formação de macroporos, com tamanho de poros maiores em solos fracos-arenoso, quando comparado com o tamanho dos agregados de um solo franco-argiloso.

Para todos os tratamentos e camadas a macroporosidade apresentou valores maiores que 0,10 m³/m³, limite mínimo crítico sugerido por Xu, Nieber e Gupta (1992) para o bom desenvolvimento vegetal.

Sabendo-se da variação dos poros mediante diferentes texturas e tamanhos de agregados do solo, e avaliando os resultados obtidos na tabela de diâmetro médio ponderado das partículas de agregados (Tabela 2) e nos gráficos de que demonstram as porcentagens de macro e microagregados do solo (Figura 4 e 5), se destaca a mudança da porosidade vista no tratamento de milho + *crotalária* na dose de 80 kg/ha de ureia para ambas as profundidades, onde se obteve os maiores valores de macroporos, comparado com os de microporos (Tabela 5).

Tabela 5: Valores da interação do tratamento pelas doses de ureia para macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) dos tratamentos estudados nas camadas de solos (0,00-0,10; 0,10-0,20m), Dracena -SP, maio de 2023.

	M	MC	MU	MUC
MA (m ³ m ⁻³) – 0,0-0,10 m				
0	0,14aA	0,11aC	0,13aA	0,12aA
40	0,13aA	0,17aB	0,12aA	0,15aA
80	0,16bA	0,26aA	0,11cA	0,11cA
120	0,14aA	0,14aBC	0,13aA	0,15aA
MI (m ³ m ⁻³) – 0,0-0,10 m				
0	0,17aA	0,20aA	0,21aA	0,21aA
40	0,20aA	0,17aA	0,20aA	0,20aA
80	0,22aA	0,08bB	0,22aA	0,22aA
120	0,19aA	0,19aA	0,20aA	0,20aA
MA (m ³ m ⁻³) – 0,10-0,20 m				
0	0,11bA	0,15aB	0,15aA	0,15aA
40	0,13aA	0,12aB	0,14aA	0,12aA
80	0,12bA	0,24aA	0,12bA	0,15bA
120	0,10bA	0,12aB	0,13aA	0,14aA
MI (m ³ m ⁻³) – 0,10-0,20 m				
0	0,19aA	0,20aB	0,23aA	0,21aA
40	0,23aA	0,23aA	0,18bA	0,22aA
80	0,22aA	0,10bC	0,21aA	0,20aA
120	0,22aA	0,22aAB	0,20aA	0,22aA

M: Milho (*Zea mays*); MC: Milho + *Crotalaria spectabilis*; MU: Milho + *Urochloa ruziziensis*; MUC: Milho + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*; médias seguidas de mesma letra, minúscula nas linhas e maiúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de tukey a 5 % de significância. Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses valores de macroporos demonstram alta estruturação do solo, mas baixos valores de microporosidade podem afetar o armazenamento de água para as plantas como descrito por Kerber *et al.* (2013), que em sua pesquisa verificou que quanto menor a quantidade de microporos do solo, menor é a lâmina de água disponível nas camadas de solo. O maior valor de microporos encontrados nos restantes dos tratamentos pode apontar possível estado de degradação do solo, como abordado por Alves (2001).

Os tratamentos e doses utilizados não demonstraram efeitos quanto a porosidade total e densidade solo, para ambas as profundidades (Tabela 6).

Tabela 6: Valores da interação do tratamento pelas doses de ureia para porosidade total do solo (PT) e densidade do solo (DS) dos tratamentos estudados nas camadas de solos (0,00-0,10; 0,10-0,20m), Dracena -SP, maio de 2021

	M	MC	MU	MUC
PT (m ³ m ⁻³) – 0,0-0,10 m				
0	0,31aB	0,31aA	0,34aA	0,33aA
40	0,33aAB	0,34aA	0,32aA	0,35aA
80	0,38aA	0,34bA	0,33bA	0,33bA
120	0,33aAB	0,33aA	0,33aA	0,35aA
DS (g/cm ⁻³) – 0,0-0,10 m				
0	1,54bB	1,65aA	1,60aA	1,61aAB
40	1,64aA	1,63aAB	1,53bB	1,57bA
80	1,60aA	1,59aAB	1,64aA	1,66aA
120	1,62aA	1,58aA	1,63aA	1,61aAB
PT (m ³ m ⁻³) – 0,10-0,20 m				
0	0,30bB	0,35abA	0,38aA	0,36aA
40	0,36aA	0,35aA	0,32aB	0,34aA
80	0,34aA	0,34aA	0,33aB	0,35aA
120	0,32bB	0,34aA	0,33aB	0,36aA
DS (g/cm ⁻³) – 0,10-0,20 m				
0	1,60aA	1,69aA	1,57bB	1,70aA
40	1,63aA	1,64aA	1,57abB	1,53bB
80	1,67aA	1,62aA	1,65aA	1,64aA
120	1,68aA	1,67aA	1,63aA	1,63aA

M: Milho (*Zea mays*); MC: Milho + *Crotalaria spectabilis*; MU: Milho + *Urochloa ruziziensis*; MUC: Milho + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis*; médias seguidas de mesma letra, minúscula nas linhas e maiúsculas na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de tukey a 5 % de significância. Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Demattê *et al.* (2024), solos de textura arenosa possuem porosidade total por volta de 40,3% e sua densidade, valores maiores que $1,5 \text{ g/cm}^{-3}$. Para Keber *et al.* (2013) porosidade total ideal gira em torno de mais ou menos $50 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Segundo Ingaramo (2003) que a porosidade é dividida entre os espaços vazios intra-agregados que equivale a microporosidade, e os inter-agregados responsáveis pelos macroagregados do solo, e o mais afetado pelo manejo, microrganismos e pelas raízes das plantas. Quando o solo se encontra em possível processo de degradação, ocorrem modificações na estrutura, alterando e diminuindo principalmente poros maiores, os macroporos (Souza; Alves, 2003) assim alterando os valores de macro e microporos, sem alterar a porosidade total do solo.

Para a densidade do solo, os valores se adequam aos valores esperados para um solo arenoso, como descrito por Demattê *et al.* (2024). Valores de densidade acima de $1,75 \text{ g/cm}^{-3}$ podem interferir no crescimento radicular das plantas (Reichert *et al.*, 2003).

Valores de porosidade total abaixo do valor médio descrito por Demattê *et al.* (2024) refletem o fato de que as propriedades físicas de um argissolo são recuperadas lentamente com o uso de plantas de cobertura (Alves; Suzuki, 2004). Resultados semelhantes foram encontrados por Carneiro *et al.* (2009), onde a porosidade total não foi influenciada sistema de uso e manejo do solo, apenas tendências de maiores porosidade total no sistema de plantio convencional.

5.3 Textura do solo

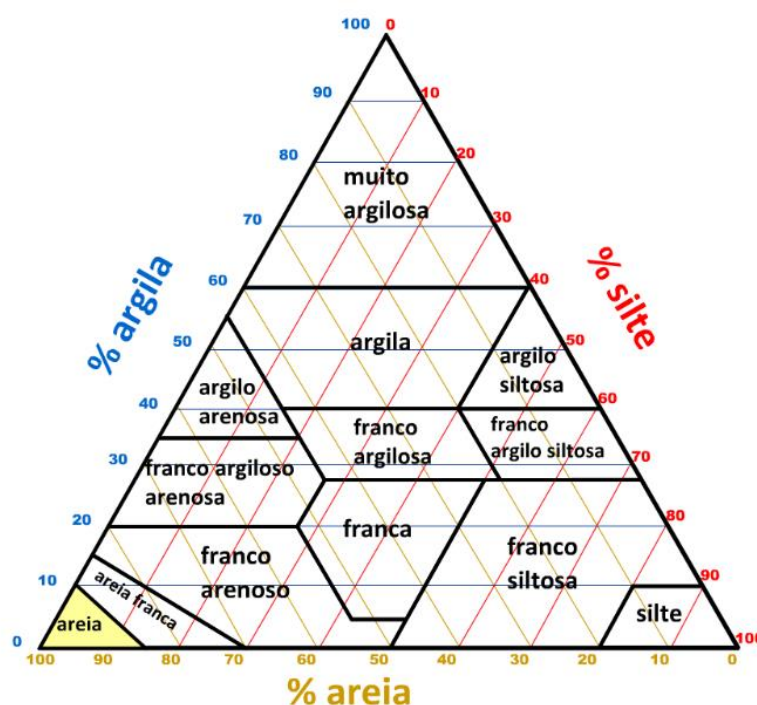
As frações de areia e silte e argila juntas compõem a parte sólida do solo e constituem a textura dele, sendo um dos primeiros pontos a serem determinados quando avaliamos um solo. A textura é algo inerente ao solo, ligado apenas a pedogênese, não se modificando diante nenhum tipo de sistema de manejo (brady; Weil, 2013).

A textura do solo pode ser dividida em grupamentos, onde a definição se baseia no teor de argila, variando de textura arenosa com valor menor que 15% de argila até

textura muito argilosa com mais de 60% de argila (Demattê *et al.*, 2024). De acordo com as quantidades de areia, silte e argila do solo podemos também classificar a textura em 13 diferentes classes texturais, utilizando o triângulo textural (EMBRAPA, 2018).

Valores encontrados na análise de textura do solo utilizado na pesquisa, foram levados ao triângulo textural como demonstrado na Figura 6. O solo do estudo é classificado como de classe textural areia, com valores de 87 a 90% de areia, 3 a 5% de silte e de 5 a 10% de argila.

Figura 6: Granulometria da área em estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Solos arenosos tem como pontos positivos a facilidade na correção de química e na recuperação, rápidas reações químicas pela baixa CTC e teores de matéria orgânica, menor quantidade de água para atingir a capacidade de campo, plantio fora de épocas chuvosas e maior eficiência de práticas culturais na época de águas. Já como desvantagens, possuem menor produtividade agrícola, menores quantidades de matéria orgânica, maiores riscos de erosão, maiores riscos de perda de água e lixiviação dos nutrientes (Demattê *et al.*, 2024).

6 CONCLUSÃO

O sistema de consórcio de plantas de cobertura com a cultura do milho demonstrou melhor resultado aos atributos físicos do solo, principalmente na resistência e formação de agregados em comparação ao cultivo do milho solteiro, principalmente nos tratamentos com milho + *crotalária*, na dose de 80 kg/ha de ureia.

Milho + *crotalária* na dose de 80kg/ha de ureia, proporcionou aumento de macroporosidade e diminuição da microporosidade, resultado muito ligado, aos valores de DMP e macroagregados do tratamento.

Valores de porosidade total não foram alterados mediante nenhum tratamento, e a densidade do solo se encontra em valores médios para um solo de textura arenosa, não tendo alterações significantes de nenhum tratamento.

REFERÊNCIAS

ALMENDRO-CANDEL, M. B.; GÓMEZ LUCAS, I.; NAVARRO PEDREÑO, J.; ZORPAS, A. A. Physical properties of soils affected by the use of agricultural waste. In: ALADJADJIYAN, A. (ed.). **Agricultural Waste and Residues**. London: IntechOpen, 2018. Cap. 2. DOI: 10.5772/intechopen.77993.

ALVARENGA, R. C. *et al.* Adubação verde como fonte exclusiva de nutrientes para a cultura do milho orgânico. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis, SC. *Meio ambiente e a nova agenda para o agronegócio de milho e sorgo: resumos expandidos*. Sete Lagoas: ABMS; Embrapa Milho e Sorgo; Florianópolis: Epagri, 2002.

ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S.; PAEPE, J. L. de. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the Pampas: a meta-analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 170, p. 53–65, 2017.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 1, p. 27-34, 2004.

BANFIELD, C. C.; PAUSCH, J.; DIPPOLD, M. A.; KUZYAKOV, Y. Microbial processing of plant residues in the subsoil: the role of biopores. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 125, p. 309–318, 2018. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.08.004.

BARBOSA, I. R.; SANTANA, R. S.; MAUAD, M.; GARCIA, R. A. Produção de matéria seca e marcha de absorção de nitrogênio, fósforo e potássio em *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e61011, 2020.

BEARE, M. H.; GREGORICH, E. G.; ST-GEORGES, P. Compaction effects on CO₂ and N₂O production during drying and rewetting of soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, p. 611–621, 2009.

BERTIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 971-982, 2012.

BIANCHO, L. E. *et al.* Manejo da irrigação e da adubação nitrogenada em cultivo de milho safrinha. **Unifunec Científica Multidisciplinar**, v. 11, n. 13, p. 1–15, 2022.

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M. T.; FINK, J. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil & Tillage Research**, v. 174, p. 104–112, 2017.

BONINI, C. S. B. **Restauração ecológica de um solo decapitado sob intervenção antrópica há 17 anos**. 2012. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

BONINI, C. S. B.; CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. D. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, 2009.

CARVALHO, R. M. Recomendação de controle ambiental na exploração de jazidas de laterita no Planalto Central. In: ENCONTRO IBERO-AMERICANO DE UNIDADES AMBIENTAIS DO SETOR TRANSPORTES, 3., 1998, Florianópolis. **Resumos...** Florianópolis: DER, 1998. CD-ROM.

CASSOL, Cidimar. **Plantas de cobertura e adubação nitrogenada como fonte de nitrogênio à cultura do milho em plantio direto**. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019.

CHAVEIRO, A. C. E. **Qualidade de um Argissolo cultivado com hortaliças em sistema plantio direto**. 2022. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

CHIEZA, E. D.; GUERRA, J. G. M.; ARAUJO, E. D. S.; ESPÍNDOLA, J. A.; FERNANDES, R. C. Produção e aspectos econômicos de milho consorciado com *Crotalaria juncea* L. em diferentes intervalos de semeadura sob manejo orgânico. **Revista Ceres**, v. 64, n. 2, p. 189–196, 2017.

COELHO, A. M. **Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. (Circular Técnica, 96). 11 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2025/2026**. Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

DA SILVA, D. F. *et al.* Características morfológicas, melhoramento genético e densidade de plantio das culturas do sorgo e do milho: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e12310313172, 2021.

DAL FERRO, N.; SARTORI, L.; SIMONETTI, G.; BERTI, A.; MORARI, F. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil & Tillage Research**, v. 140, p. 55–65, 2014. DOI: 10.1016/j.still.2014.02.003.

DUARTE, A. P.; TSUNECHIRO, A.; FREITAS, R. S. (orgs.) **3 décadas de inovações na cultura do milho safrinha: avanços e desafios**. Campinas: Instituto Agronômico, 2021. 330 p

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

FONTANÉTTI, A.; CARVALHO, G. J.; GOMES, L. A. A.; ALMEIDA, K.; MORAES, S. R. G.; TEIXEIRA, C. M. Adubação verde na produção orgânica de alface americana e repolho. **Horticultura Brasileira**, v. 24, n. 2, p. 146–150, 2006.

FORSTHOFER, E. L.; SILVA, P. R. F.; STRIEDER, M. L.; MINETTO, T.; RAMBO, L.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; SUHRE, E.; SILVA, A. A. Rendimento agrônômico e desempenho econômico do milho em diferentes níveis de manejo e épocas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.399-407. 2006.

FREITAS, R. J.; NASCENTE, A. S.; SANTOS, F. L. S. População de plantas de milho consorciado com *Urochloa ruziziensis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 1, p. 79-87, mar. 2013.

GALINDO, F.S.; TEIXEIRA FILHO, M.M.; BUZETTI, S.; LUDKIEWICZ, M.G.; ROSA, P.A.; TRITAPEPE, C. A. Viabilidade técnica e econômica da co-inoculação com *Azospirillum brasilense* em cultivares de soja no Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, p.51-56, 2018.

GASSEN, D.N.; GASSEN, F.R. **Plantio direto**. Passo Fundo Aldeia Sul, 1996. 207p. GAVANDE, S.A. **Física del suelos: principios y aplicaciones**. Ciudad del México: Editorial Limusa, 1976. 351 p.

GONTIJO NETO, M. M.; MAY, A.; VANIN, A.; SILVA, A. F.; SIMÃO, E. P.; SANTOS, E. A.; QUEIROZ, L. R.; BARCELOS, V. G. F. Avaliação de cultivares e épocas de semeadura de milho safrinha na região de Rio Verde (GO). In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA, 12., 2015, Dourados. *Estabilidade e produtividade: anais*. Brasília, DF: Embrapa; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015.

GRANT, C. D.; DEXTER, A. R. Air entrapment and differential swelling as factors in the mellowing of molded soil during rapid wetting. **Australian Journal of Soil Research**, v. 28, p. 361–369, 1990.

GREENLAND, D. J. Soil management and soil degradation. **Journal of Soil Science**, London, v. 31, p. 301-322, 1981.

HEINRICHES, R.; COSTA, N. R.; MEIRELLES, G. C. Estado da arte e fatores intrínsecos na física de solos no manejo de pastagens. In: HEINRICHES, R.; SOARES FILHO, C. V.; BONINI, C. S. B. (orgs.). **Simpósio de Adubação e Manejo de Pastagens / Simpósio de Produção Animal a Pasto**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2017. v. 1, p. 58–75.

INGARAMO, O. E. **Indicadores físicos de la degradación del suelo**. 2003. 298 f. Tese (Doutorado) – Universidade da Coruña, La Coruña, 2003.

JASTROW, J. D.; MILLER, R. M.; LUSSENHOP, J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, p. 905–916, 1998.

JIA, X.; ZHAO, C.; WANG, Y.; ZHU, Y.; WEI, X.; SHAO, M. Traditional dry soil layer index method overestimates soil desiccation severity following conversion of cropland into forest and grassland on China's Loess Plateau. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 291, p. 106794, 2020

KERBER, T. L.; KLEIN, V. A.; KLEIN, C.; GRAEBIN, G. J.; RECK, R.; MACIOSK, D. Porosidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho Distroférico típico sob plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais [...]**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relação solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

KITAMURA, E. M. **Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto**. 2007. 117 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2007.

KLUTHCOUSKI, J.; COBUCCI, T.; AIDAR, H.; YOKOYAMA, L. P.; OLIVEIRA, I. P. de; COSTA, J. L. S.; SILVA, J. G.; VILELA, L.; BARCELLOS, A. O.; MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. (Circular Técnica).

KRAVCHENKO, A.; GUBER, A.; GUNINA, A.; DIPPOLD, M.; KUZYAKOV, Y. Pore-scale view of microbial turnover: combining ¹⁴C imaging, μ CT and zymography after

adding soluble carbon to soil pores of specific sizes. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 2, p. 593–607, 2021. DOI: 10.1111/ejss.13001.

KUMAR, R.; MAHAJAN, G.; SRIVASTAVA, S.; SINHA, A. Green manuring: a boon for sustainable agriculture and pest management: a review. **Agricultural Review**, v. 35, n. 3, p. 196–206, 2014.

LONGHINI, V. Z.; ANDREOTTI, M.; SOUZA, W. C. R.; COSTA, N. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; MONTANARI, R. Nitrogen fertilization and inoculation with diazotrophic bacteria in corn intercropped with xaraés grass. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias – Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 12, n. 3, p. 340–347, 2017.

LU, J.; ZHANG, Q.; WERNER, A. D.; LI, Y.; JIANG, S. Z. Root-induced changes of soil hydraulic properties: a review. **Journal of Hydrology**, v. 589, p. 125203, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125203.

MACEDO, M. C. M. integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **revista brasileira de zootecnia**, v. 38, n. 1, p. 133-146, 2009.

MAKINO, P. A.; CECCON, G.; FACHINELLI, R. Produtividade e teor de nutrientes em populações de milho safrinha solteiro e consorciado com braquiária. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 2, p. 206-220, 2019.

MARLAND, G.; GARTEN JR., C. T.; POST, W. M.; WEST, T. O. Studies on enhancing carbon sequestration in soils. **Energy**, v. 29, p. 1643–1650, 2004.

MATOS, A. M. S. **Qualidade estrutural de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico em sistema ILPF**. 2022. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Sistemas de Produção) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

MATOS, F. B., DE OLIVEIRA, F. F., PIETROSKI, M., MULLER, P. F., TAKESHITA, V., CAIONE, G. Uso de *Azospirillum brasilense* para o aumento da eficiência da adubação nitrogenada em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 1, p. 131-141, 2017.

MELO, V. D. N. **Cultivo do feijão-caupi em sucessão a sistemas de consórcio e aplicação de nitrogênio em cobertura**. 2024. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) – Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Dracena, Dracena, 2024.

MOTTIN, M. C. *et al.* Efeito do cultivo de milho consorciado com plantas de cobertura na produção de massa seca e nas propriedades físicas do solo. **Conjecturas**, v. 22, n. 9, p. 70–91, 2022.

NANTES, L. S. **Subsolo exposto em recuperação há 30 anos: influência de estratégias de manejo sob atributos físicos e químicos**. 2024. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Sistemas de Produção) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2024.

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; ROSA, J. A.; COOPER, M.; HECK, R. J.; PASSONI, S. W.; ROQUE, W. L. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 165, p. 66–79, 2017. DOI: 10.1016/j.still.2016.07.010.

PORTUGAL, J. R., ARF, O., PERES, A. R., GITTI, D. D. C., GARCIA, N. F. S. Coberturas vegetais, doses de nitrogênio e inoculação com *Azospirillum brasilense* em milho no Cerrado. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 4, p. 639–649, Oct. 2017.

ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006.

ROTH, C.; JOSCHKO, M. A note on the reduction of runoff from crusted soils by earthworm burrows and artificial channels. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 154, p. 101–105, 1991.

SANDERSON, M. A.; ELWINGER, G. F. Plant density and environment effects on Orchardgrass-White clover mixtures. **Crop Science**, v. 42, p. 2055-2063, 2002.

SANTOS, M. A. **Restauração da qualidade do solo utilizando sistema agroflorestal com base agroecológica**. 2022. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Sistemas de Produção) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

SILVA, E. C. DA; MURAOKA, T.; VELOSO, M. E. C. DA; TRIVELIN, P. C. O. Aproveitamento do nitrogênio (15N) da crotalária e do milheto pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de cerrado. **Ciência Rural**, v.36, p.739-746, 2006b.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. de S. **Matéria Orgânica do Solo**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FERREIRA, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Orgs.). *Fertilidade do Solo*. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SILVA, W. R. **A importância das interações planta-animal nos processos de restauração.** In: KAGEYAMA, P. Y.; OLIVEIRA, R. E. de; MORAES, L. F. D. de; ENGEL, V. L.; GANDARA, F. B. (Org.). Restauração ecológica de ecossistemas naturais. Botucatu: FEPAF, 2003. p. 79-88.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, p. 18-23, 2003.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., & TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo (3a ed.)**. Brasília: Embrapa, 2017.

TEIXEIRA, W. G.; SCHROTH, G.; FACCIN, O. P.; HUNE, B.; ZECH, W. Avaliação de parâmetros físico-químicos e hídricos do solo como indicadores da recuperação de áreas degradadas na Amazônia Ocidental. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE AREAS DEGRADADAS, 3., 1997, Viçosa, MG. **Anais...Viçosa: UFV**, 1997. p. 166-174.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. D.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **World Agricultural Production**. Washington: Foreign Agricultural Service/USDA, 2025. 39 p. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

VARGAS, T. O.; DINIZ, E. R.; SANTOS, R. H. S.; LIMA, C. T. A.; URQUIAGA, S.; CECON, P. R. Influência da biomassa de leguminosas sobre a produção de repolho em dois cultivos consecutivos. **Horticultura Brasileira**, v. 29, n. 4, p. 562-568, 2011.

WU, G. L.; CUI, Z.; HUANG, Z. Contribution of root decay process on soil infiltration capacity and soil water replenishment of planted forestland in semi-arid regions. **Geoderma**, v. 404, p. 115289, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115289>.

XIAO, T. P.; LI, W.; FEI, J. WANG. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review. **Science of the Total Environment**, v. 906, p. 167524, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167524>

YUDINA, A.; KLYUEVA, V.; ROMANENKO, K. D.; Micro-within-macro: how micro aggregation shapes the soil pore space and water-stability. **Geoderma**, v. 415, p. 115771, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115771>

ZEMOLIN, L. S. **Análise das propriedades físicas de um Argissolo sob diferentes manejos e intensidade de tráfego agrícola**. 2017. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha; Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.