

Inoculação de plantas do género *Trifolium* com bactérias fixadoras de azoto: efeitos em propriedades físicas e químicas do solo

Wélida Maiara Tomazoni Keller

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau
de Mestre em Agroecologia*

Orientado por:

Professora Doutora Felícia Maria da Silva Fonseca (ESA-IPB)

Professora Doutor Paulo Cesar Conceição (UTFPR-DV)

Bragança

2024

Inoculação de plantas do género *Trifolium* com bactérias fixadoras de azoto: efeitos em propriedades físicas e químicas do solo

Wélida Maiara Tomazoni Keller

Felícia Maria da Silva Fonseca

Paulo Cesar Conceição

Bragança

2024

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pela saúde que tem me dado até o presente momento que através dele conseguimos correr atrás dos nossos objetivos, com muita fé e coragem.

Quero agradecer muito à minha orientadora, a Professora Doutora Felícia Fonseca. Ela compartilhou seu conhecimento e tempo comigo desde o começo até o fim do experimento. A orientação dela foi muito importante na hora de fazer as análises e escrever. E agradeço demais pela paciência e cuidado que teve comigo durante todo esse processo.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Paulo Cezar, agradeço por estar ao meu lado e me apoiar em mais essa etapa.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, agradeço por me proporcionar oportunidades incríveis de crescimento acadêmico, profissional e pessoal durante toda a graduação, além de me incentivar a explorar novos horizontes com o programa de Dupla Diplomação.

Ao Instituto Politécnico de Bragança, especialmente à Escola Superior Agrária, expresso minha gratidão por me receber e acolher, fornecendo os instrumentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus avós por todo o carinho e ensinamento ao longo de todos esses meus anos de estudo e que apoiaram todos os meus sonhos nunca cortando minhas asas sempre me estimulando a voar cada vez mais alto, pois não importa o tamanho do seu sonho, mas sim a sua garra para realizá-lo. Quero agradecer aos meus colegas e amigos por dedicarem seu tempo para me ajudar no experimento e compartilharem seus conhecimentos para as análises. Um agradecimento especial a todos que me apoiaram, principalmente àqueles que se tornaram minha família durante o tempo longe de casa.

Resumo

O solo é um recurso essencial para a sustentabilidade ambiental e a produção agrícola, desempenhando um papel fundamental no ciclo de nutrientes, regulação hídrica e suporte ao crescimento das plantas. No entanto, práticas agrícolas inadequadas, como o uso excessivo de agrotóxicos e fertilizantes sintéticos, bem como a ausência de técnicas de conservação, têm degradado o solo, comprometendo sua qualidade e capacidade produtiva. Para mitigar esses impactos, o uso de leguminosas associadas a bactérias fixadoras de azoto, como *Trifolium spp.*, surge como uma solução eficaz. Essas bactérias promovem a fixação biológica de azoto (FBA), enriquecendo o solo com nutrientes, melhorando sua estrutura e reduzindo a necessidade de insumos químicos. Além disso, a inoculação com rizóbios auxilia na prevenção da erosão e compactação do solo, favorecendo sua conservação. O ensaio incluiu 22 tratamentos e foi conduzido ao longo de 52 dias para avaliar o efeito da inoculação de plantas do género *Trifolium* com diferentes cepas de rizóbios nas propriedades físicas e químicas do solo. No final do experimento, foram coletadas amostras perturbadas e não perturbadas de solo para avaliação de parâmetros físicos (permeabilidade, densidade aparente, porosidade, capacidade máxima para a água, capacidade de campo e estabilidade dos agregados) e químicos do solo (carbono orgânico e azoto total). Os resultados demonstram que a inoculação com rizóbios melhora significativamente a estrutura e fertilidade do solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes e otimizando a retenção de água. Entre as cepas testadas, destacaram-se a RRA e a RSB, que mostraram efeitos particularmente benéficos. A cepa RRA, filogeneticamente próxima de *Rhizobium leguminosarum* e *Rhizobium phaseoli*, mostrou-se eficaz em aumentar a porosidade e a retenção de água, otimizando a circulação de ar e proporcionando um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular. Por outro lado, a cepa RSB, relacionada a *Agrobacterium radiobacter*, contribuiu para o aumento da disponibilidade de azoto e melhoria da estrutura do solo, enriquecendo-o e aumentando sua fertilidade. Esses achados reforçam o potencial do uso de cepas de rizóbios e leguminosas para promover práticas agrícolas mais sustentáveis, incentivando a conservação do solo e o aumento da produtividade agrícola.

Palavras-chave: propriedades do solo, sustentabilidade agrícola, leguminosas, carbono orgânico, manejo do solo, fertilidade do solo, conservação do solo.

ABSTRACT

Soil is an essential resource for environmental sustainability and agricultural production, playing a fundamental role in nutrient cycling, water regulation, and supporting plant growth. However, inadequate agricultural practices, such as excessive use of pesticides and synthetic fertilizers, along with the lack of conservation techniques, have degraded soil, compromising its quality and productive capacity. To mitigate these impacts, the use of legumes associated with nitrogen-fixing bacteria, such as *Trifolium spp.*, emerges as an effective solution. These bacteria promote biological nitrogen fixation (BNF), enriching the soil with nutrients, improving its structure, and reducing the need for chemical inputs. Additionally, inoculation with rhizobia helps prevent soil erosion and compaction, favoring soil conservation. The experiment included 22 treatments and was conducted over 52 days to evaluate the effect of inoculating plants of the genus *Trifolium* with different strains of rhizobia on the physical and chemical soil properties. At the end of the experiment, disturbed and undisturbed soil samples were collected to evaluate the physical (permeability, bulk density, porosity, maximum water capacity, field capacity, and aggregate stability) and chemical parameters of the soil (organic carbon and total nitrogen). The results demonstrate that inoculation with rhizobia significantly improves soil structure and fertility, increasing nutrient availability and optimizing water retention. Among the strains tested, RRA and RSB stood out, which showed particularly beneficial effects. The RRA strain, phylogenetically close to *Rhizobium leguminosarum* and *Rhizobium phaseoli*, proved to be effective in increasing porosity and water retention, optimizing air circulation, and providing a favorable environment for root development. On the other hand, the RSB strain, related to *Agrobacterium radiobacter*, contributed to increasing nitrogen availability and improving soil structure, enriching it and increasing its fertility. These findings reinforce the potential of using rhizobia and legume strains to promote more sustainable agricultural practices, encouraging soil conservation and increased agricultural productivity.

Keywords: soil properties, sustainable agriculture, legumes, organic carbon, soil management, soil fertility, soil conservation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVO	13
2.1 Objetivos específicos	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1. Solo	14
3.1.1 Horizontes do solo	15
3.1.2 Agregados do solo	18
3.1.3 Densidade aparente do solo.....	20
3.1.4 Erosão do solo	22
3.2 Coberturas Verdes	23
3.3. Fixação biológica de Azoto e seus efeitos no solo.....	24
3.4 Efeitos dos organismos do solo nas propriedades do solo	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1 Descrição do local onde decorreu o ensaio.....	27
4.2 Instalação e manutenção do ensaio	28
4.2.1 Instalação do ensaio	28
4.2.2 Delineamento experimental.....	29
4.2.3 Manutenção do ensaio	31
4.3. Colheita de amostras de solo	32
4.4 Determinação de Propriedades físicas do solo	34
4.4.1. Permeabilidade do solo	34
4.4.2 Densidade aparente do solo.....	37
4.4.3 Porosidade Total.....	37
4.4.4 Capacidade de campo e capacidade máxima para a água	38
4.4.5 Microporosidade e macroporosidade	38
4.4.6 Estabilidade dos agregados	38
4.5 Determinação de propriedades químicas do solo.....	41
4.5.1 Carbono e azoto do solo.....	41
4.6 Análises estatísticas	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Propriedades físicas do solo	42
5.1.1 Densidade aparente do solo.....	48
5.1.2 Porosidade total, microporosidade e macroporosidade.....	45
5.1.3 Permeabilidade do solo	48

5.1.4 Capacidade de campo e capacidade máxima para a água	52
5.1.5 Estabilidade dos agregados do solo	55
5.2 Propriedades Químicas do Solo.....	59
5.3 Efeitos das cepas de rizóbio e das espécies de trevos nas propriedades físicas e químicas do solo	63
6. CONCLUSÃO.....	68
BIBLIOGRAFIA	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática do perfil de solo, mostrando seus principais horizontes ou camadas. Fonte: Lima et al., (2007).....	16
Figura 2. Exemplos de horizontes O, H, A, B, C. Fonte: Lima et al., (2007).	18
Figura 3. Representação esquemática (apenas duas dimensões) dos principais tipos de estrutura (agregados) do solo (estrutura em blocos normalmente com tamanho entre 0,5 e 3 cm; estrutura granular - normalmente com tamanho entre 1 e 5 mm). Fonte: Lima et al. (2007).	19
Figura 4. Imagem do local de implementação do experimento. Fonte: Google Barth (2023).....	27
Figura 5. Colheita de solo num olival localizado em Vilarinho dos Galegos, Mogadouro. Fonte: Keller (2024).	28
Figura 6. Vasos dos tratamentos dispostos na bancada da estufada ESA. Fonte: Keller (2024)..	29
Figura 7. Esquema da distribuição dos vasos na bancada e da legenda dos tratamentos. Fonte: Keller (2024).	30
Figura 8. Variação da temperatura dentro da estufa durante o período de ensaio. Fonte: Keller (2024).	32
Figura 9. Colheita de amostras de solo nos vasos dos tratamentos. Fonte: Keller (2024).....	33
Figura 10. Permeâmetro de circuito fechado utilizado na avaliação da permeabilidade do solo. Fonte: Keller (2024).	34
Figura 11. Estabilizador de Agregados utilizado na determinação da estabilidade de agregados. Fonte: Keller (2024).	39
Figura 12. Densidade aparente do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$)..	50
Figura 13. Densidade aparente do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$)..	51
Figura 14. Densidade aparente do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$)..	52
Figura 15. Porosidade (P), macroporosidade (MacroP), microporosidade (MicroP) do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□).....	43
Figura 16. Porosidade (P), macroporosidade (MacroP), microporosidade (MicroP) do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□).....	44
Figura 17. Porosidade (P), macroporosidade (MacroP), microporosidade (MicroP) do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□).	48
Figura 18. Coeficiente de permeabilidade do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).	53
Figura 19. Coeficiente de permeabilidade do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c).	

Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).	54
Figura 20. Coeficiente de permeabilidade do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).	55
Figura 21. Capacidade máxima para a água (CMA) e capacidade de campo (CC) do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□).	46
Figura 22. Capacidade máxima para a água (CMA) e capacidade de campo (CC) do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□).	48
Figura 23. Capacidade máxima para a água (CMA) e capacidade de campo (CC) do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).	56
Figura 24. Estabilidade das classes de agregados do solo (classe 0,25 e classe 0,4 mm) dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).	57
Figura 25. Estabilidade das classes de agregados do solo (classe 0,25 e classe 0,4 mm) dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).	57
Figura 26. Estabilidade das classes de agregados do solo (classe 0,25 e classe 0,4 mm) dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).	58
Figura 27. Carbono orgânico e azoto total do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).	61
Figura 28. Carbono orgânico e azoto total do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□).	62
Figura 29. Carbono orgânico e azoto total do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□).	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. <i>Espécies de Trifolium e sua origem geográfica, utilizadas para o isolamento de bactérias fixadoras de azoto.</i>	31
Tabela 2. <i>Classificação da permeabilidade dos solos (SCS/USDA)</i>	36
Tabela 3. <i>Efeitos das cepas de Rhizobium nas propriedades físicas e químicas do solo. Para cada propriedade do solo, valores seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$) (média \pm DP).</i>	63
Tabela 4. <i>Efeitos de plantas do género Trifolium (trevos subterrâneos, TS; trevos porte ereto, TE) com (Cin) e sem (Sin) inoculação em parâmetros físicos e químicos do solo. Para cada propriedade do solo, valores seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$) (média \pm DP).</i> ..	67

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso fundamental para a sustentabilidade ambiental e a produção agrícola, desempenhando um papel crucial no ciclo de nutrientes, na regulação hídrica e no suporte ao crescimento das plantas. Cerca de 90% dos alimentos e matérias-primas que sustentam a vida humana dependem diretamente do solo (FAO, 2022). Contudo, a degradação desse recurso essencial tem se intensificado devido a práticas agrícolas inadequadas, como o uso indiscriminado de agrotóxicos, fertilizantes sintéticos, manejo ineficiente e ausência de técnicas de conservação do solo (Montanarella et al., 2015).

Entre os maiores desafios enfrentados pelos agricultores está a erosão hídrica, agravada pelas chuvas intensas e pelo escoamento superficial descontrolado. Essa degradação do solo compromete a sua estrutura, reduzindo sua capacidade de retenção de água e nutrientes, além de limitar a produtividade agrícola a longo prazo (Santana & Araújo, 2018). Como resposta a essa situação alarmante, o uso de práticas de manejo sustentável, como a fixação biológica de azoto (FBA) por leguminosas, vem ganhando destaque. Essas técnicas contribuem para melhorar a estrutura do solo e aumentar a sua fertilidade, ao mesmo tempo que reduzem a dependência de insumos químicos, especialmente fertilizantes azotados (Hungria et al., 2007).

Para compreender a importância dessas técnicas, é essencial analisar o solo como um sistema formado por partículas sólidas arranjadas em agregados, cuja estabilidade é fundamental para a retenção de água, porosidade e densidade aparente (Lepsch, 2010). A degradação física desses agregados, resultante de práticas inadequadas, como o cultivo intensivo sem rotação de culturas ou a ausência de plantas de cobertura, promove a compactação e aumenta a vulnerabilidade à erosão (Montanarella et al., 2015).

Práticas de manejo conservacionistas, como a sementeira direta, a rotação de culturas e o uso de coberturas vegetais, são estratégias eficazes para manter a saúde do solo a longo prazo (Alves et al., 2024). Essas medidas ajudam a manter a sua estrutura, promovendo uma melhor fertilidade e produtividade agrícola sustentável. Entre as soluções mais promissoras está a utilização de leguminosas inoculadas com rizóbios, como o *Trifolium spp.*, que favorecem a fixação de azoto atmosférico no solo, enriquecendo-o com

nutrientes essenciais e melhorando sua capacidade de suporte às plantas (Espindola et al., 2005).

O presente estudo visa avaliar os efeitos da inoculação de bactérias fixadoras de azoto em plantas do género *Trifolium* sobre as propriedades físicas (estabilidade dos agregados, permeabilidade, densidade, porosidade, retenção de água) e químicas (carbono e azoto) do solo. A análise destes dados permitirá fornecer diretrizes práticas para agricultores, adaptadas a diferentes tipos de solo, com foco na otimização da produtividade e na sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2. OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é estudar os efeitos que a inoculação de bactérias fixadoras de azoto em plantas do género *Trifolium* produz em propriedades físicas e químicas do solo.

2.1 Objetivos específicos

Avaliar a estabilidade dos agregados do solo: Investigar como a inoculação influencia a resistência dos agregados do solo à desagregação, um fator importante para a prevenção da erosão e manutenção da estrutura do solo, bem como para a qualidade do solo.

Medir a permeabilidade do solo: Examinar as mudanças na capacidade do solo de transmitir água e ar, o que é essencial para o crescimento radicular e atividade microbiana.

Determinar a densidade do solo: Avaliar como a compactação do solo é afetada pela inoculação e como isso influencia a disponibilidade de espaço para raízes e microrganismos.

Analisar a porosidade do solo: Investigar a quantidade de espaços vazios no solo, crucial para a retenção de água e aeração.

Quantificar a retenção de água no solo: Estudar a capacidade do solo de reter água, um fator fundamental para a disponibilidade de água às plantas e atividade biológica no solo.

Medir os teores de carbono (C) no solo: Avaliar o impacto da inoculação nos teores de carbono, um indicador de matéria orgânica que afeta a fertilidade e a estrutura do solo.

Medir os teores de Azoto (N) no solo: Investigar as alterações nos teores de azoto, essencial para o crescimento das plantas e metabolismo microbiano.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Solo

O solo é um recurso fundamental para a vida terrestre, conforme destacado por Silvestre et al. (2022), derivando seu nome do latim *solum*, que significa suporte, base e fundação. Composto por 46% de matéria mineral, 4% de matéria orgânica, 25% de ar e 25% de água, o solo forma um equilíbrio essencial para o desenvolvimento da vegetação e a manutenção de ecossistemas. Aproximadamente 90% da produção global de alimentos e matérias-primas dependem diretamente do solo, tornando sua conservação crucial para a segurança alimentar e para a sobrevivência das espécies que dele dependem (FAO,2015).

A formação do solo é um processo complexo e contínuo, envolvendo a ação de agentes externos como luz solar, água e organismos vivos, que atuam sobre a rocha-mãe em um processo conhecido como meteorização ou intemperismo (Gusmão Filho, 2002). Esse processo gera alterações físicas e químicas nas rochas, resultando na alteração e formação do solo. Ao longo do tempo, fatores como o clima, a topografia e a biologia local moldam a estrutura e a composição do solo, levando à formação de horizontes, ou camadas, que caracterizam o perfil do solo e diferenciam os tipos de solo ao redor do mundo (Lepsch, 2010).

As propriedades físicas do solo, como a permeabilidade, densidade e porosidade, são essenciais para determinar sua capacidade de reter água, fornecer aeração e permitir o crescimento das raízes. No entanto, as propriedades químicas são igualmente importantes, desempenhando um papel central na fertilidade do solo. Componentes como o carbono orgânico e o azoto são fundamentais; o carbono orgânico indica a quantidade de matéria orgânica, influenciando a retenção de nutrientes, enquanto o azoto é vital para o crescimento vegetal, estando envolvido em processos como a fotossíntese e a produção de proteínas. A disponibilidade limitada de azoto faz com que os solos dependam de mecanismos naturais, como a fixação biológica de azoto pelas leguminosas, para garantir a produtividade agrícola (Bertoni e Lombardi Neto, 1990).

Compreendendo a importância das propriedades físicas e químicas, é evidente que a preservação do solo é indispensável para sua capacidade de sustentar a vida. Práticas agrícolas sustentáveis, como o uso de leguminosas fixadoras de azoto e a rotação de culturas, são eficazes em manter o equilíbrio de carbono e azoto no solo, contribuindo para a sua conservação. A manutenção de níveis adequados de matéria orgânica e nutrientes assegura a saúde do solo e promove a sustentabilidade agrícola, essencial para a continuidade dos sistemas produtivos e para a preservação do meio ambiente (FAO, 2015; FAO/ITPS, 2015).

A diversidade de solos ao redor do mundo é vasta e resulta de uma combinação de fatores físicos, químicos e biológicos. Propriedades como textura, estrutura, pH e capacidade de troca de cátions, bem como a quantidade e qualidade da matéria orgânica presente, influenciam diretamente a capacidade do solo de sustentar diferentes formas de vida (COM, 2006). A compreensão e gestão desses fatores são essenciais para a manutenção da fertilidade do solo e para a implementação de práticas de uso sustentável que promovam a conservação dos recursos naturais.

3.1.1 Horizontes do solo

Conforme Lima et al. (2007), os processos de meteorização intensificam-se à medida que as rochas se desagregam, aumentando a porosidade do solo, o que favorece a retenção de água e elementos químicos. Esse ambiente cria condições ideais para a colonização de organismos pioneiros, como líquenes, algas e musgos. Com o tempo, o solo se torna mais espesso, possibilitando o crescimento de plantas maiores que, por sua vez, contribuem com matéria orgânica. Esta, ao longo dos anos, é continuamente incorporada ao solo.

A seção vertical que vai da superfície do solo até as rochas subjacentes, denomina-se de perfil do solo. O perfil do solo pode ser formado por um ou mais horizontes, conforme ilustrado na Figura 1. Esses horizontes representam diferentes camadas formadas por processos como adição, perda, transporte e transformação de materiais. São geralmente identificados por letras maiúsculas: H, O, A, B, C e R (Figuras 1 e 2) (Lima et al., 2007).

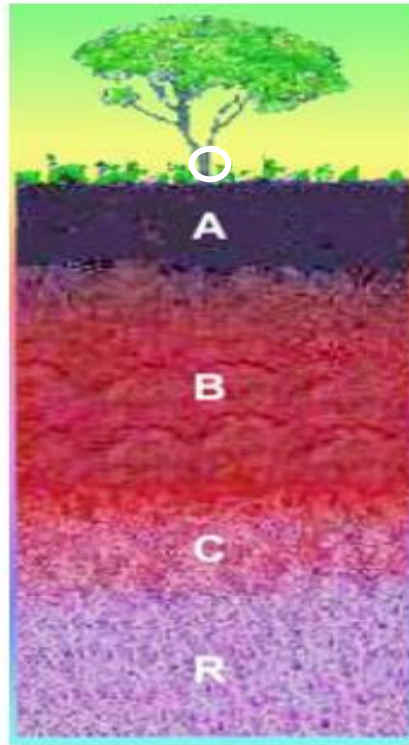


Figura 1. Representação esquemática do perfil de solo, mostrando seus principais horizontes ou camadas. Fonte: Lima et al., (2007).

O horizonte H, classificado como orgânico, pode ser comumente encontrado em áreas com excesso de água, como pântanos ou várzeas (Figura 2). As formações deste tipo caracterizam-se pela sua espessura significativa, riqueza em matéria orgânica e coloração escura. O excesso de água nessas áreas inibe a ação dos microrganismos aeróbios, que dependem de oxigênio para sobreviver, promovendo a decomposição lenta da matéria orgânica. Nestes cenários, ocorre produção e incorporação de matéria orgânica no solo de forma expressiva, no entanto a taxa de decomposição é reduzida, resultando na formação do horizonte H (Lima et al., 2007). O horizonte O, também conhecido como horizonte orgânico, é representado comumente pela letra O, inicial da palavra "orgânico". A sua espessura é variável devido às condições climáticas e ao tipo de vegetação predominantes nas áreas em que se encontram. Conforme ilustrado na Figura 2, este consiste numa camada composta por folhas, galhos, flores, frutos e resíduos de animais depositados sobre o horizonte A. Pode ser encontrado, normalmente, em solos de áreas florestais, no entanto a sua presença é menor ou até ausente em áreas agrícolas. O cultivo dos solos promove muitas vezes a decomposição acelerada deste tipo de horizonte (Lima et al., 2007).

O horizonte A, conhecido como horizonte mineral superficial, situa-se sob o horizonte O, quando presente, e é formado pela mistura de matéria orgânica com os minerais do solo. Por incluir menor quantidade de matéria orgânica, em comparação com os horizontes O e H, este é considerado um horizonte mineral. Essencial na agricultura, este horizonte concentra a maioria das raízes das plantas, no entanto é também o primeiro a receber poluentes depositados no solo, o que evidencia o seu papel crucial na sustentabilidade do meio ambiente. A coloração mais ou menos escura deste horizonte deve-se essencialmente ao teor de matéria orgânica presente no solo. A sua espessura pode variar conforme o clima e a vegetação, e é influenciada diretamente pela precipitação. Este horizonte é também o mais poroso, e o que apresenta maior atividade biológica, influenciando atributos importantes na preparação do solo (Lima et al., 2007).

Logo abaixo do horizonte A, encontra-se o horizonte B, cuja coloração é predominantemente influenciada pelos minerais de ferro presentes na fração de argila. As tonalidades mais comuns desse horizonte variam entre vermelho, amarelo e vermelho-amarelado (Figura 1). Em comparação ao horizonte A, o horizonte B apresenta um menor teor de matéria orgânica e uma atividade biológica reduzida. Sua espessura pode variar de apenas alguns centímetros até vários metros, e suas características, como fertilidade, coloração, tipo e tamanho dos agregados, mineralogia e a proporção de areia, silte ou argila, também podem apresentar variações consideráveis (Lima et al., 2007).

O horizonte C fica abaixo do horizonte B, e representa as rochas intemperizadas, podendo exibir manchas de diversas cores (Figura 2).

O horizonte R é a camada mais profunda do perfil do solo e representa a rocha matriz ainda não submetida ao processo de intemperismo significativo. Caracteriza-se por sua elevada dureza e consolidação, funcionando como uma base estrutural para os horizontes superiores. No entanto, é importante notar que, se essa camada for escavável com ferramentas manuais, ela não é considerada horizonte R, sendo classificada como

horizonte C, que corresponde a materiais rochosos já intemperizadas, mas ainda parcialmente preservados.

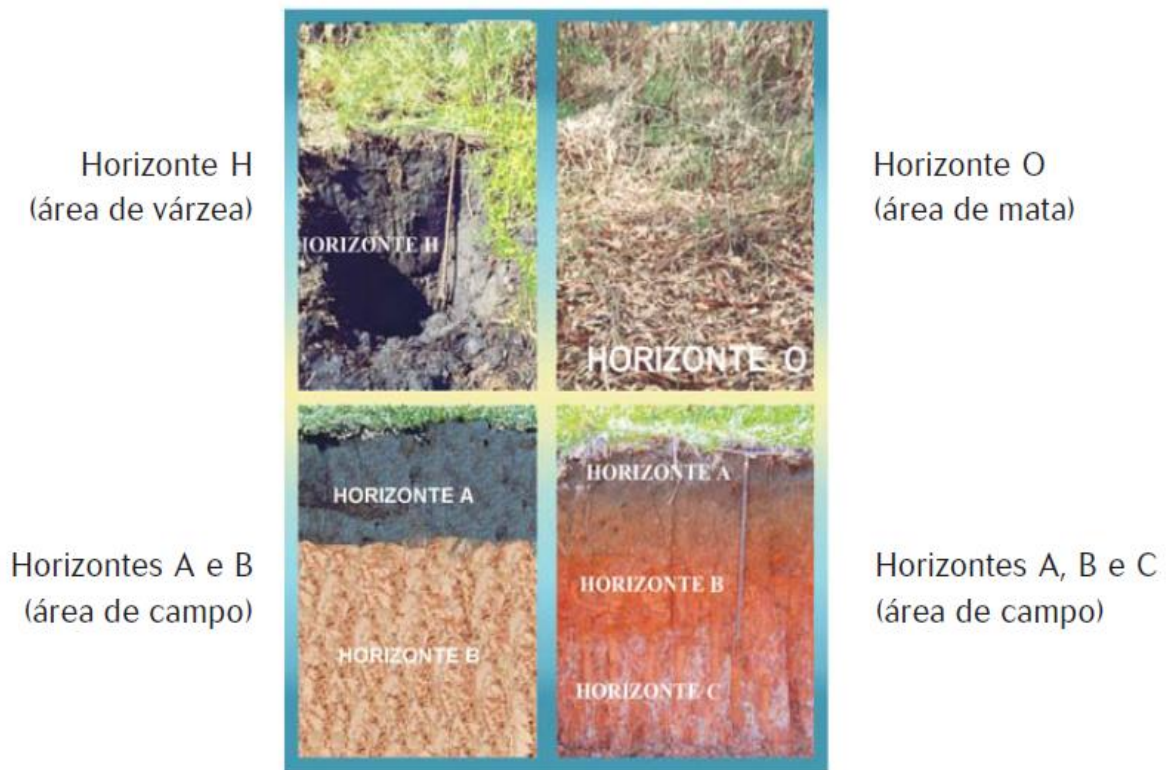


Figura 2. Exemplos de horizontes O, H, A, B, C. Fonte: Lima et al., (2007).

3.1.2 Agregados do solo

A formação de agregados no solo é essencial para sua estrutura e capacidade de retenção de água, ar e nutrientes. A formação dos agregados envolve duas fases, na primeira ocorre a união de partículas de argila, silte e areia através de substâncias orgânicas (como húmus) e minerais (como óxidos de ferro e argilas), formando agregados. Na segunda fase formam-se fissuras, as partículas posteriormente unidas são expostas a mudanças de humidade; a alternância entre períodos de humedecimento e secagem, causam a expansão e contração do solo, formando fendas que ajudam à formação de agregados. Além desses fatores, a penetração de raízes, atividade biológica e a ação de animais também podem ser importantes na formação dos agregados. Estas alterações ajudam a melhorar a estrutura do solo, permitindo uma melhor circulação de ar, água e nutrientes, o que é benéfico para as plantas e para a saúde do solo (Lepsch, 2010).

De acordo com o grau de evolução de cada solo, os agregados que os constituem variam as suas formas e tamanhos. Em solos mais jovens, é comum encontrar-se agregados com formato de blocos, que são estruturas maiores, com tamanhos entre 0,5 e 3 cm. Em solos mais maduros, os agregados tendem a ter forma granular ou esférica, com tamanhos menores, semelhantes a pequenas esferas com diâmetros entre 1 e 5 mm (Figura 3) (Lima et al., 2007).

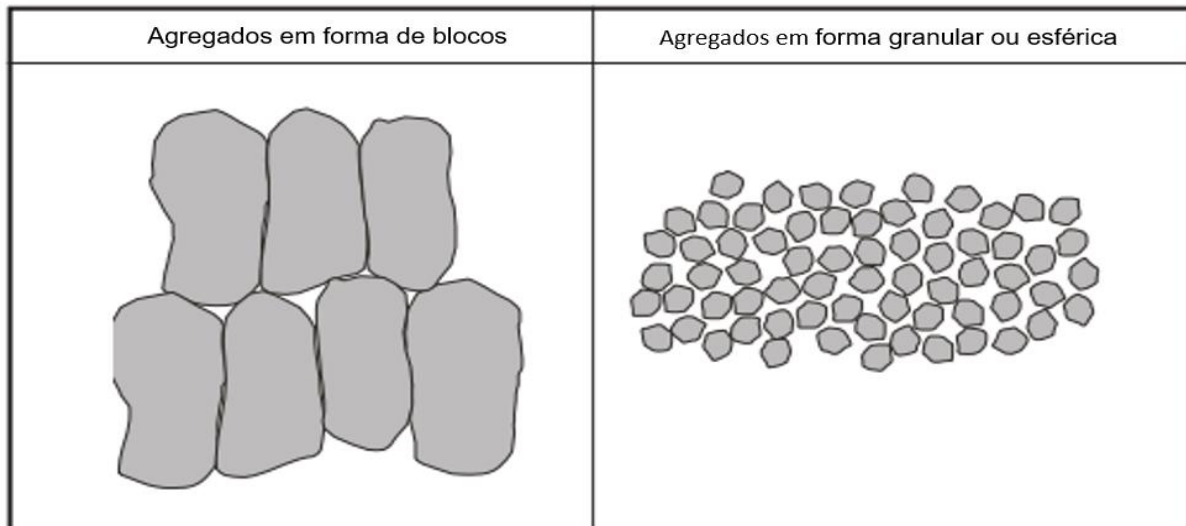


Figura 3. Representação esquemática (apenas duas dimensões) dos principais tipos de estrutura (agregados) do solo (estrutura em blocos normalmente com tamanho entre 0,5 e 3 cm; estrutura granular - normalmente com tamanho entre 1 e 5 mm). Fonte: Lima et al. (2007).

O tamanho das partículas do solo (cascalho, areia, silte e argila), influencia diretamente suas propriedades físicas, como porosidade, permeabilidade, plasticidade e resistência à erosão. A proporção de partículas menores, como argila e silte, em comparação com as maiores, como areia e cascalho, determina características importantes do solo, como o tamanho e a quantidade de poros, permeabilidade ao ar e à água, plasticidade e viscosidade. Essas características afetam a facilidade de manejo com máquinas agrícolas e a resistência à erosão (Lepsch, 2010).

Diversos fatores podem interferir na formação de agregados do solo, os principais são: o tipo e teor de argila e a presença de metais polivalentes, como ferro, alumínio e manganês, o carbonato de cálcio, e os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Além destes, a matéria orgânica presente no solo, os exsudatos orgânicos das plantas e dos

microrganismos desempenham também um papel preponderante na agregação (Pereira et al., 2020).

A estabilidade da agregação do solo é um fator crucial para a capacidade de arejamento, infiltração, retenção de nutrientes e desenvolvimento de raízes. Essa estabilidade está diretamente relacionada com o teor de carbono orgânico presente no solo (Salton et al., 2008). Quando as unidades estruturais do solo não são estáveis em contato com a água, seja por precipitação ou irrigação, os agregados podem ser destruídos, o que resulta muitas vezes em poros entupidos por partículas finas que bloqueiam a circulação de ar e água (Pereira et al., 2020). Os processos de degradação física do solo estão assim diretamente relacionados com a alteração dos agregados, estes são essenciais para a criação de condições favoráveis ao crescimento e proteção das plantas. As frações de argila e húmus presentes nestes agregados formam complexos argilo-húmicos que contribuem para a agregação do solo, adsorvem nutrientes essenciais para as plantas e reduzem as perdas por lixiviação, garantindo assim maior disponibilidade de água e nutrientes no solo (Lima et al., 2007; Lepsch, 2010).

Práticas agrícolas inadequadas, como a preparação do solo fora do período recomendado, queima de matéria orgânica (que atua como agente de ligação), uso excessivo de fertilizantes com cátions dispersantes e ausência de cobertura vegetal, podem também reduzir a estabilidade dos agregados (Pereira et al., 2020).

3.1.3 Densidade aparente do solo

A densidade do solo é uma propriedade física dinâmica que muda conforme a textura e as condições estruturais do solo. Esta é diretamente influenciada pela compactação causada, muitas vezes, pela pressão dos maquinários e condições ambientais. Esta propriedade do solo define-se como sendo a massa de solo seco por unidade de volume, incluindo tanto os sólidos quanto os poros. Solos com poros mais largos têm densidade mais baixa comparativamente com solos mais compactados nos quais os poros são de menor dimensão. Assim, qualquer fator que afete a porosidade de um solo afetará diretamente a sua densidade (Araújo et al., 2012).

Os poros do solo formam-se juntamente com o agrupamento da fase sólida em agregados, e estes podem ser de dois tipos principais: macroporos e microporos. De diâmetro igual ou superior a 0,05 mm os macroporos, poros responsáveis pela drenagem e aeração do solo, localizam-se usualmente entre os agregados e são formados através do arranjo dos mesmos, pelos canais criados por raízes e fauna do solo, pela expansão e contração das argilas ou pelo cultivo do solo. Os microporos, poros responsáveis pela retenção da água no solo, têm diâmetro menor que 0,05 mm e formam-se no interior dos agregados. Estas formações dependem principalmente da textura do solo, bem como da quantidade e origem dos agregados (Lima et al., 2007).

Diversos fatores podem impactar negativamente os macroporos e os microporos do solo. O pisoteio de animais, o uso excessivo de maquinários agrícolas e práticas inadequadas de cultivo, especialmente em solos com alta suscetibilidade à compactação, afetam diretamente os macroporos; os microporos podem contrair em solos submetidos à desidratação, reduzindo a capacidade de retenção de água e prejudicando os pelos capilares e fungos em crescimento (Pereira et al., 2020). Estas estruturas têm ainda um papel preponderante na estabilidade e saúde dos solos, os macroporos são cruciais no fornecimento de oxigênio às raízes das plantas e organismos do solo, enquanto os microporos são responsáveis por armazenar água para sustentar a vida no solo (Lima et al., 2007).

Tal como referido anteriormente a compactação do solo afeta também a sua densidade. Esta condição ocorre quando há quebra das estruturas físicas do solo, levando à diminuição dos espaços porosos, o que prejudica a formação e penetração das raízes em camadas mais profundas, limita as trocas gasosas e reduz a infiltração de água, tornando o solo mais vulnerável à erosão (Lepsch, 2010).

Na atualidade, a compactação do solo é um dos principais problemas da agricultura podendo diminuir em até 60% os rendimentos agrícolas em todo o mundo. É também responsável pela degradação de aproximadamente 680.000 km² de solo ao nível do globo, ou seja, cerca de 4% das terras agrícolas totais (Montanarella et al., 2015).

3.1.4 Erosão do solo

A erosão dos solos é um problema global, apesar de mais acentuada nos países em desenvolvimento, é cada vez mais uma preocupação de nações tecnologicamente mais avançadas. Nos Estados Unidos, as preocupações associadas à erosão dos solos ganharam relevância nos inícios do século XX. Segundo Bentley (1985), a degradação dos solos americanos tem recebido crescente atenção ao longo do último século. As pesquisas têm tentado definir e quantificar o problema, e líderes rurais e conservacionistas têm vindo a alertar a nação acerca desta crise. Bentley (1985) destaca também a necessidade de medidas mais enérgicas para evitar a erosão do solo, incluindo a implementação de práticas de conservação que melhorem o manejo dos recursos hídricos e da própria terra.

Morgan (1986) destaca que a erosão dos solos esteve sempre associada à agricultura em regiões tropicais e semiáridas, mas nos últimos anos têm afetado diversas áreas climáticas em países desenvolvidos, incluindo áreas agrícolas e de recreação. Na Europa, onde a chuva não é tão propícia a processos erosivos em grande escala e há maior consciência social, esses problemas têm-se tornado mais frequentes. Conforme observado por Boardman (1990), embora os mecanismos de erosão dos solos britânicos não sejam totalmente compreendidos, algumas áreas sofrem erosão regularmente, o que causa preocupação. Nos últimos anos, decorreram vários encontros na Europa para discutir o tema, incluindo um workshop sobre "Erosão dos Solos em Áreas Agrícolas" em Coventry, na Inglaterra, em 1989, com especialistas de todo o mundo.

Diversos esforços têm sido feitos na tentativa de entender os mecanismos e processos de erosão dos solos. Guerra (1991) enfatiza a necessidade de desenvolver projetos com uma metodologia de pesquisa integrada, tendo em conta as propriedades do solo, a cobertura vegetal e o uso da terra, tudo isso em diferentes escalas espaciais e temporais.

Nos cultivos agrícolas o revolvimento do solo, altera a agregação, principalmente das argilas, que retém a maior parte dos nutrientes necessários às plantas, facilitando o seu escoamento por ação da chuva e do vento, causando erosão (Würsche & Denardin, 1980). A erosão pode ainda ser estimulada pelo uso excessivo de equipamentos de preparação do solo, sendo que esse incremento será maior se o solo permanecer descoberto no período de maior intensidade de chuva (Benatti Júnior et al., 1983).

O uso de adubação verde e os métodos de preparação do solo com recurso ao mínimo de mobilização são técnicas agrícolas que podem contribuir para diminuir a perda de solo (Rydberg, 1990), e melhorar suas propriedades físicas, como densidade e resistência à penetração (Kayombo & Lal, 1993; Hall *et al.*, 1994 e Dao, 1996).

3.2 Coberturas Verdes

A modificação constante da cobertura do solo, aliada às ações humanas, tem intensificado sua degradação, comprometendo áreas fundamentais para a agricultura (Meneses, 2013). Em solos de áreas florestais, perdas significativas têm sido registadas, especialmente devido a incêndios, que removem a vegetação protetora e deixam o terreno vulnerável à ação da chuva e à erosão hídrica. Essa vulnerabilidade pode resultar em processos como movimentos de massa, deslizamentos e escoadas superficiais.

Diante das consequências desses problemas, tem-se procurado minimizar os efeitos dessas atividades e eventos com medidas sustentáveis e de mitigação. Nesse contexto, é essencial identificar as áreas mais suscetíveis à erosão hídrica, permitindo ações imediatas nas áreas mais afetadas (medidas reativas) e a implementação de políticas para promover a sua sustentabilidade, com medidas preventivas (Meneses, 2011).

Muitos agricultores têm procurado opções mais sustentáveis para a produção agrícola e, por isso, têm optado por usar plantas herbáceas para manter a cobertura permanente do solo, especialmente em sistemas de agricultura biológica (Darolt, 1998). Redin *et al.* (2016) destacam que o uso de plantas de cobertura traz benefícios diretos e indiretos para culturas perenes.

As plantas de cobertura são cruciais para proteger o solo, uma vez que reduzem a energia cinética das gotas da chuva ao cair, diminuindo a erosão e promovendo a infiltração da água no perfil do solo (Bertoni & Lombardi Neto, 2005). Além disso, a prática de utilização de cobertura vegetal morta, demonstra ser eficaz na minimização da perda de água por evaporação. Nestes casos a biomassa vai atuar como uma barreira, evitando o contacto direto da radiação solar com o solo e contribuindo para estabilizar as oscilações de temperatura. O uso de leguminosas pode ser uma estratégia eficiente e vantajosa na proteção do solo, uma vez que são consideradas adubos verdes capazes de incorporar

grande quantidade de azoto atmosférico nos solos (Arruda & Costa, 2003). Ball et al. (2020) demonstraram também que as leguminosas podem ser usadas como culturas de cobertura, plantadas entre as culturas principais para proteger e enriquecer o solo com nutrientes.

Além da fixação de azoto, as leguminosas também ajudam a melhorar a qualidade do solo, aumentam a matéria orgânica, melhoram a sua estrutura e promovem a biodiversidade microbiana (Ordóñez-Fernández et al., 2018; Weinert et al., 2023). A família das leguminosas (*Fagaceae*) inclui aproximadamente 13 mil espécies descritas, divididas em 600 géneros, estas podem ser encontradas tanto em climas temperados, como em climas tropicais (Arruda & Costa, 2003).

No contexto de Trás-os-Montes, em Portugal, várias espécies do género *Trifolium* spp. são utilizadas para diversos fins, como a proteção do solo, devido à sua resistência a invernos rigorosos. Estas plantas são particularmente valiosas para os produtores da região de Bragança, pois garantem cobertura vegetal durante os meses mais frios e chuvosos do ano, o que ajuda a prevenir a erosão do solo (Aguiar & Rodrigues, 2010).

De acordo com os dados climáticos da região de Bragança, recolhidos entre 1971 e 2000, a precipitação média anual é de 758 mm. A região caracteriza-se por um clima mediterrâneo, com verões secos e chuvas concentradas no outono e inverno, condições que favorecem o uso de plantas como o *Trifolium* spp. para proteção do solo (IPMA, 2022; IPMA, 2023). Essas plantas contribuem para a manutenção da saúde do solo, criando uma camada protetora que retém a umidade e ajuda a preservar sua estrutura

3.3. Fixação biológica de azoto e seus efeitos no solo

A fixação biológica de azoto (FNA) realizada por ação de bactérias que criam nódulos nas raízes de leguminosas (*Fabaceae*), conhecidas como rizóbios, é afetada por diversos fatores relacionados com o solo e o clima (Sadowsky 2005). O cultivo de leguminosas pode aumentar a diversidade de organismos no solo, criando um ambiente mais equilibrado e saudável (Andreola, 2001). A aparência desses nódulos é única para cada planta. Além disso, as leguminosas podem ser específicas ou generalistas na simbiose, associando-se a uma ou várias espécies de bactérias (Corby, 1981; Moreira & Siqueira, 2006), dependendo da espécie.

Na relação mutualística entre bactérias e leguminosas, as bactérias promovem o aumento de massa verde das plantas, aumentando conseqüentemente a produção de matéria orgânica. De acordo com Hungria et al. (2007), a FBA pode suprir todas as necessidades deste nutriente por parte das plantas hospedeiras. Além disso, parte do azoto fixado pode ser usado por culturas subseqüentes, diminuindo a necessidade de adubação azotada adicional (Baldissera & Scherer, 1991; Andreola & Fernandes, 2007).

A FBA é uma prática sustentável que contribui para a produtividade do solo a longo prazo, diminuindo a necessidade de insumos químicos adicionais. Ao reduzir a dependência de fertilizantes azotados sintéticos, a FBA também diminui as emissões de gases como o óxido nitroso (N₂O), que é um importante gás de efeito estufa. Além disso, a FBA auxilia na recuperação de solos pobres em nutrientes, melhorando suas condições para o cultivo de outras culturas. Essa prática, portanto, não só beneficia diretamente as leguminosas e culturas subseqüentes, mas também tem um impacto positivo na saúde e na produtividade do solo, promovendo a sustentabilidade agrícola a longo prazo (Calegari, 1991).

3.4 Efeitos dos organismos do solo nas propriedades do solo

O estudo das interações entre microrganismos do solo é essencial para compreender a dinâmica dos processos que regulam as relações entre solo e plantas na biosfera. Pesquisas sobre essas interações biológicas e suas influências no crescimento e produtividade das espécies vegetais em sistemas agrossilvopastoris têm ampliado o entendimento da biologia da rizosfera, com implicações significativas para uma agricultura moderna e sustentável (Pereira et al., 2020). Entre os microrganismos envolvidos, destacam-se as bactérias rizóbios, responsáveis pela fixação biológica de azoto (FBN) por meio de simbiose com leguminosas. Segundo Santos et al. (2008), atualmente foram identificados 12 gêneros e 62 espécies de rizóbios, com a expectativa de que esses números aumentem à medida que mais leguminosas sejam estudadas.

A prática da adubação verde, por meio do cultivo de leguminosas, oferece diversos benefícios aos microrganismos do solo, especialmente para os rizóbios, que formam uma relação simbiótica com as raízes dessas plantas. Esses microrganismos desempenham um papel crucial na fixação do azoto atmosférico, disponibilizando esse nutriente essencial

para as plantas em troca de carboidratos produzidos na fotossíntese. O cultivo de leguminosas, assim, se configura como uma estratégia eficaz para aumentar a disponibilidade de azoto nos agro-sistemas, embora a quantidade de azoto fixada varie de acordo com a espécie de leguminosa e as condições ambientais de cultivo. A inoculação de sementes é uma etapa fundamental para maximizar esse processo de fixação, sendo que o uso de fertilizantes nitrogenados ou agrotóxicos pode comprometer a eficácia dessa simbiose (Espindola et al., 2005).

Além de estimular a atividade dos rizóbios, o cultivo de leguminosas também influencia a população de fungos micorrízicos arbusculares (MA) no solo. Esses fungos formam associações simbióticas com várias espécies vegetais, proporcionando benefícios como a maior absorção de água e nutrientes, melhoria da estrutura do solo e aumento da resistência das plantas a patógenos. Essa interação não só promove o crescimento vegetal, como também contribui para a saúde do solo, criando um ambiente agrícola mais sustentável e produtivo.

As leguminosas possuem a capacidade de fixar entre 56 e 224 kg/ha de azoto, dependendo de fatores como o tipo de cobertura vegetal, pH do solo, temperatura, umidade, disponibilidade de azoto e a presença de rizóbios. Em ambientes controlados, como estufas, diferentes plantas de cobertura demonstram significativa absorção de nutrientes do solo, incluindo fósforo, potássio e manganês, o que pode impactar a disponibilidade desses nutrientes para as culturas subsequentes (Ingels et al., 1998).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição do local onde decorreu o ensaio

O estudo foi realizado no município de Bragança, localizado na região de Trás-os-Montes, no nordeste de Portugal. A região é caracterizada por um clima mediterrânico de influência continental, com invernos frios e verões quentes, fatores que podem influenciar o desenvolvimento das culturas. O experimento foi conduzido em vasos, dispostos dentro de uma estufa nas instalações da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança. A estufa está situada nas coordenadas geográficas 41°47'48.8" N e 6°45'43.2" W, a uma altitude de 674 m acima do nível do mar. A escolha do local permitiu maior controle sobre as variáveis ambientais, minimizando interferências externas no desenvolvimento do experimento (Figura 4).



Figura 4. Imagem do local de implementação do experimento. Fonte: Google Barth (2023).

4.2 Instalação e manutenção do ensaio

4.2.1 Instalação do ensaio

O solo utilizado no ensaio foi proveniente da camada arável (0-20 cm) de um olival localizado na aldeia de Vilarinho dos Galegos pertencente ao município de Mogadouro, na região de Trás-os-Montes (Figura 5). Trata-se de um Leptossolo, unidade predominante na região do NE português, ocupando aproximadamente 72% da área total. Os Leptossolos caracterizam-se por serem solos delgados (menos de 30 cm de espessura), baixo teor de matéria orgânica (menos de 2%) e alta pedregosidade (superior a 25%). Encontram-se frequentemente degradados pela erosão e/ou práticas agrícolas.



Figura 5. Colheita de solo num olival localizado em Vilarinho dos Galegos, Mogadouro. Fonte: Keller (2024).

Após a recolha e transporte do solo para as estufas da Escola Superior Agrária de Bragança, este foi devidamente peneirado (peneira com malha de 4,25 mm) e homogeneizado para ser pesado e colocado em vasos de polietileno utilizados na instalação do ensaio. Cada vaso tinha 21,5 cm de altura, 15,5 cm de diâmetro e 0,045216 m² de área; estes foram preenchidos com 5,7 kg de solo até cerca de 5 cm abaixo do limite superior do vaso, a 16,5 cm de altura. Após a pesagem do solo e distribuição pelos vasos, realizou-se a sementeira dos trevos (Figura 6). A sementeira decorreu no fim da tarde do

dia 23 de maio de 2023, com uma densidade de 40 kg de sementes por hectare. Antes da sementeira foi adicionada água nos vasos até atingir 80% da capacidade de campo do solo (Figueiredo, 2013). As sementes foram colocadas a uma profundidade de 5 mm.



Figura 6. Vasos dos tratamentos dispostos na bancada da estufada ESA. Fonte: Keller (2024).

4.2.2 Delineamento experimental

O delineamento do ensaio seguiu um esquema inteiramente casualizado (DIC). Foram realizadas inoculações separadas, utilizando seis estirpes de bactérias fixadoras de azoto, combinadas com três conjuntos de misturas de diferentes espécies de trevos. O primeiro conjunto testado incluía trevos subterrâneos, utilizando sementes de *Trifolium subterraneum* cv. Campeda e WOGLOOP. O segundo conjunto consistia em trevos de porte ereto, compostos por sementes de *Trifolium vesiculosum* e *Trifolium incarnatum*. O terceiro conjunto combinava a mistura dos trevos subterrâneos com os de porte ereto. O ensaio também incluiu quatro tratamentos controle: um constituído apenas pelo solo original, sem sementeira, e os outros três contendo as mesmas combinações de trevos descritas anteriormente, porém sem inoculação. Ao todo, o experimento ficou composto por

110 vasos (22 tratamentos x 5 repetições cada) (Figura 7). Não foi realizado o controle das ervas daninhas, de modo a reproduzir as condições de campo, relativamente a este fator.

Tratamento	Descrição
A	Testemunha (SO)
B	Mistura trevos subterrâneos (sem inoculação) – (TS-c)
C	Mistura trevos de porte ereto (sem inoculação) – (TE-c)
D	Mistura trevos subterrâneos + trevos porte ereto (sem inoculação) – (TS+TE-c)
E	Mistura trevos subterrâneos + cepa RHA – (TS+cRHA)
F	Mistura trevos de porte ereto + cepa RHA – (TE+cRHA)
G	Mistura trevos subterrâneos + trevos porte ereto + cepa RHA – (TS+TE+cRHA)
H	Mistura trevos subterrâneos + cepa RMB – (TS+cRMB)
I	Mistura trevos de porte ereto + cepa RMB – (TE+cRMB)
J	Mistura trevos subterrâneos + trevos porte ereto + cepa RMB – (TS+TE+cRMB)
K	Mistura trevos subterrâneos + cepa RNA – (TS+cRNA)
L	Mistura trevos de porte ereto + cepa RNA – (TE+cRNA)
M	Mistura trevos subterrâneos + trevos porte ereto + cepa RNA – (TS+TE+cRNA)
N	Mistura trevos subterrâneos + cepa RQ – (TS+cRQ)
O	Mistura trevos de porte ereto + cepa RQ – (TE+cRQ)
P	Mistura trevos subterrâneos + trevos porte ereto + cepa RQ – (TS+TE+cRQ)
Q	Mistura trevos subterrâneos + cepa RRA – (TS+cRRA)
R	Mistura trevos de porte ereto + cepa RRA – (TE+cRRA)
S	Mistura trevos subterrâneos + trevos porte ereto + cepa RRA – (TS+TE+cRRA)
T	Mistura trevos subterrâneos + cepa RSB – (TS+cRSB)
U	Mistura trevos de porte ereto + cepa RSB – (TE+cRSB)
V	Mistura trevos subterrâneos + trevos porte ereto + cepa RSB – (TS+TE+cRSB)

R2	D1	T4	J1	J3	K4	T2	M5	C2	P4	U2	C4	V1	I3	E5	R4	J2	B5	F3
A1	T1	P1	H4	O1	C1	L4	I1	U5	S1	E1	G5	O4	E2	H1	V2	B2	F4	L2
	B4	S2	L3	E3	R3	J5	F1	H5	M3	A4	Q4	V4	Q5	P5	G2	O2	K1	B3
	S5	G3	R5	L5	V3	Q3	N5	A5	F2	C3	N2	R1	K5	F5	L1	U3	H2	N4
	O3	U4	C5	D5	I4	G1	A3	E4	D3	O5	I2	N1	D2	T3	A2	H3	P2	V5
	I5	B1	U1	M2	S3	J4	M1	Q1	G4	K2	K3	D4	P3	Q2	N3	M4	T5	S4

Figura 7. Esquema da distribuição dos vasos na bancada e da legenda dos tratamentos. Fonte: Keller (2024).

As cepas usadas para a inoculação foram coletadas na região de Trás-dos-Montes conforme descrito na Tabela 1, com sua localidade de coleta e o código de isolamento.

Tabela 1. *Espécies de Trifolium e sua origem geográfica, utilizadas para o isolamento de bactérias fixadoras de azoto.*

Localidade	Cultura	Espécie de trevo	Código do isolado
Macedo de cavaleiros	Castanheiro	<i>Trifolium incarnatum</i>	RRA
Bragança	Pastagem	<i>Trifolium pratense</i>	RQ
Macedo de cavaleiros	Pastagem	<i>Trifolium repens</i>	RMB
Bragança	Olival	<i>Trifolium subterraneum</i>	RNA
Bragança	Pastagem	<i>Trifolium subterraneum</i>	RHA
Macedo de cavaleiros	Amendoal	<i>Trifolium vesiculosum</i>	RSB

4.2.3 Manutenção do ensaio

Após a sementeira, os vasos foram monitorados por um período de 52 dias, entre 23 de maio e 17 de julho de 2023. Esse intervalo abrangeu o início da floração das plantas daninhas, marcando o momento de maior produção de biomassa vegetal. Durante o experimento, os vasos foram regados três vezes por semana, garantindo que o solo mantivesse um teor de umidade entre 60% e 80% de sua capacidade de campo, condição ideal para o desenvolvimento das plantas.

Para o controle da temperatura ao longo do ensaio, utilizou-se um Data Logger, que registrou uma temperatura média de 24,9 °C. As temperaturas máximas e mínimas

observadas foram de 44,3 °C e 11,5 °C, respectivamente (Figura 8), garantindo o monitoramento constante das condições ambientais dentro do período experimental.

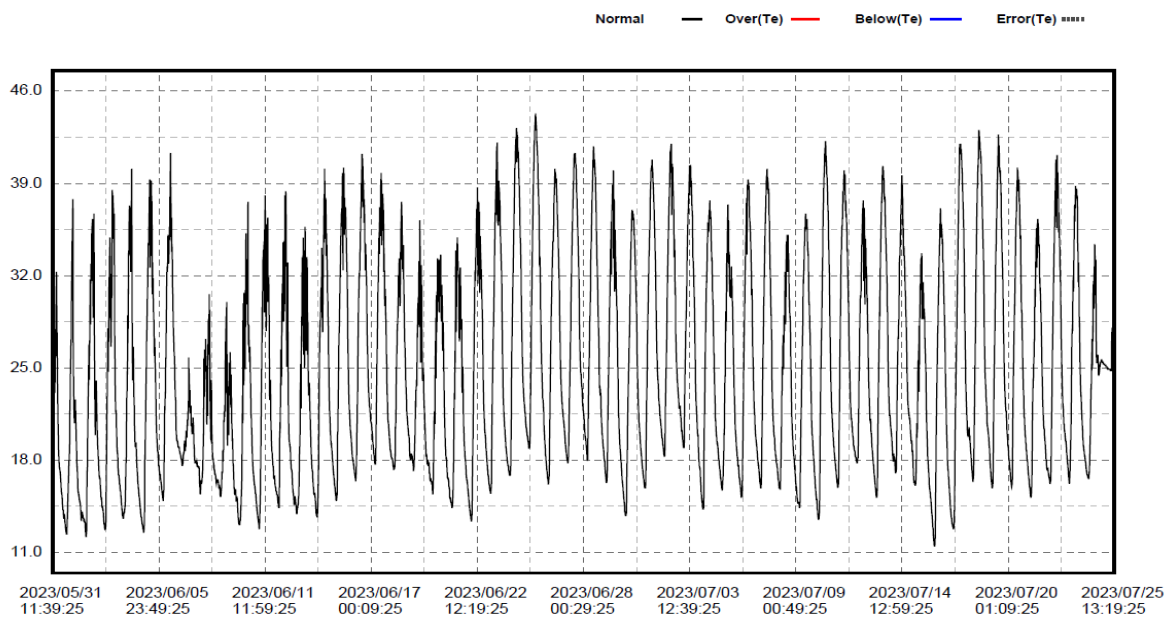


Figura 8. Variação da temperatura dentro da estufa durante o período de ensaio. Fonte: Keller (2024).

4.3. Colheita de amostras de solo

Para avaliar as propriedades físicas do solo dos diversos tratamentos, foram coletadas amostras não perturbadas usando cilindros padronizados com volume de 100 cm³ em todos os vasos dos tratamentos (Figura 9). As propriedades físicas analisadas foram:

- Permeabilidade (k): medida pela capacidade que um solo tem de permitir a passagem de água através dos seus poros.
- Densidade aparente (Dap): calculada pela razão entre a massa seca do solo e o volume da amostra. Fornece uma indicação do estado de compactação do solo.
- Microporosidade (MicroP): refere-se à quantidade de espaços porosos muito pequenos presentes no solo (< 0,05 mm), que retêm água para as plantas.
- Macroporosidade (MacroP): mede a quantidade de espaços porosos maiores presentes no solo (≥ 0,05 mm), que permitem a drenagem de água, aeração e o crescimento das raízes.

- Porosidade total (P): calculada através da soma da microporosidade e macroporosidade, representa a totalidade dos espaços vazios no solo.
- Capacidade de campo (CC): define a quantidade de água retida no solo após a drenagem completa de água livre, ou seja, a quantidade de humidade presente no solo quando este é capaz de reter água contra a gravidade.
- Capacidade máxima do solo para a água (CMA): representa a quantidade máxima de água que o solo pode reter antes de se tornar saturado.

Estas propriedades foram calculadas, pois permitem compreender o comportamento do solo relativo à retenção de água, capacidade de drenagem e espaço disponível para as raízes das plantas.

Para avaliar os teores de carbono e azoto no solo dos diversos tratamentos, foram coletadas amostras perturbadas, que foram levadas para o laboratório para proceder ao seu processamento e análise.



Figura 9. Colheita de amostras de solo não perturbadas nos vasos dos tratamentos. Fonte: Keller (2024).

4.4 Determinação de Propriedades físicas do solo

4.4.1. Permeabilidade do solo

Para avaliar o coeficiente de permeabilidade do solo (K), foi utilizado um permeâmetro de circuito fechado, com carga constante, com capacidade para 24 amostras de solo não perturbadas em anéis de aço inoxidável de 100 cm^3 ($20 \text{ cm}^2 \times 5 \text{ cm}$). O permeâmetro está localizado no Laboratório de Solos Aulas da Escola Superior Agrária de Bragança e é usado em atividades pedagógicas e de pesquisa (Figura 10).



Figura 10. Permeâmetro de circuito fechado utilizado na avaliação da permeabilidade do solo.
Fonte: Keller (2024).

Antes da inserção das amostras no permeâmetro, a parte externa dos anéis foi limpa. Em seguida, uma gaze hidrofílica foi colocada na extremidade não biselada dos anéis, seguida pela colocação do filtro. Os anéis foram então instalados com o filtro voltado para baixo na armação de suporte, para garantir que a água fluísse através da amostra na direção correta durante a medição, já que o fluxo natural do solo é descendente. As amostras foram travadas com uma braçadeira, pressionando a tampa de nylon sobre o filtro

para fixar o anel na armação de suporte. Assim, o suporte com o anel ficou pronto para ser inserido no permeâmetro.

As amostras foram inicialmente saturadas, mantendo o nível de água cerca de 1 cm abaixo da parte superior da armação de suporte, e permaneceram assim por 24 horas. Cada amostra estava conectada a uma bureta (40 ml) para registrar o volume de água por unidade de tempo durante as medições.

Foi aplicado o método de carga constante a todas as medições. A circulação de água no sistema iniciou-se através da inserção de sifões no sistema. Estes foram colocados com uma extremidade dentro do cilindro da amostra e a outra no tubo sintético de evacuação numerado, garantindo o encerramento do circuito hidráulico. As medições foram iniciadas após uma hora, de modo a garantir que o circuito hidráulico estivesse estabilizado para cada amostra.

Numa primeira fase, as medições do nível de água dentro e fora do cilindro, que continha a amostra, foram realizadas para calcular a diferença de nível (dH), necessária para o cálculo do coeficiente de permeabilidade saturada. A diferença de nível pode variar entre 2 mm, para solos altamente permeáveis, e 20 mm, para solos pouco permeáveis (Santos, 2019). Os níveis de água foram medidos com um medidor instalado no próprio aparelho.

Em seguida, mediu-se o volume de água que fluiu através de cada amostra durante um período máximo de 30 minutos. As buretas foram fechadas quando atingiram sua capacidade máxima (40 ml) ou após 30 minutos se o volume não tivesse atingido o máximo. O volume de água e o tempo correspondente para cada amostra foram registrados. As medições foram realizadas individualmente em cada amostra por 4 dias consecutivos.

No final das medições, as amostras foram retiradas do permeâmetro deixadas em repouso (período de drenagem), sendo posteriormente efetuadas três pesagens: após 1h (solo saturado), após 24h (solo na capacidade de campo) e após terem sido levadas à estufa a 105°C por 48h (peso do solo seco).

O cálculo da permeabilidade inicial (Ki) foi feito através dos resultados do primeiro dia de medições após a saturação das amostras, enquanto a permeabilidade final (Kf) foi obtida com a média das três últimas medições.

A Lei de Darcy é utilizada para o cálculo de K (permeabilidade saturada) quando é aplicado o método da carga constante, considerando:

$$k = \frac{V \times L}{A \times t \times dH}$$

K → coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (cm / h);

V → volume de água que flui através da amostra (1 ml = cm³);

dH → diferença de nível de água dentro e fora do cilindro da amostra (cm);

L → comprimento da amostra de solo (cm);

A → Superfície da secção transversal da amostra (cm²);

t → tempo estabelecido para a medição do volume V (h).

O comprimento (L) e a superfície da secção transversal (A) foram constantes para todas as amostras, 5 cm e 20 cm², respetivamente.

Tabela 2. Classificação da permeabilidade dos solos (SCS/USDA)

Classe de permeabilidade (designação)	Valor (cm/h)
Muito rápida	>25,4
Rápida	12,7 - 25,4
Moderadamente rápida	6,35 - 12,7
Moderada	2,00 - 6,35
Moderadamente lenta	0,50 - 2,00
Lenta	0,13 - 0,50
Muito lenta	<0,13

Segundo Figueiredo (2011) é possível que os valores obtidos para a permeabilidade saturada sejam discrepantes das condições *in loco*, por mais precisa que a avaliação do permeâmetro seja, uma vez que pode existir uma não uniformidade do solo e irregularidades na colheita das amostras, assim a permeabilidade resultante reflete a permeabilidade do solo onde a amostra foi coletada, para obtenção de dados realmente representativos, é preciso um número grande de amostras do ensaio.

4.4.2 Densidade aparente do solo

A densidade aparente do solo (D_{ap}) é um valor adimensional, determinado pela razão entre a massa volúmica aparente do solo (ρ_s) e a da água ($\rho = 1 \text{ g / cm}^3$)

$$D_{ap} = \frac{\rho_s}{\rho}$$

Fórmula massa volúmica (ρ_s)

$$\rho_s = \frac{M_{\text{solo seco}}}{V_{\text{cilindro}}}$$

Onde M solo seco foi obtida por pesagem da amostra seca na estufa a 105°C até peso constante (durante pelo menos 24h) e V cilindro = $A * L$. O volume do cilindro onde foi colhida a amostra, corresponde ao volume da amostra.

4.4.3 Porosidade Total

A porosidade total do solo (P) foi calculada a partir da razão entre água de saturação e o volume do cilindro (Figueiredo, 2011):

$$\%P = 100 \times \frac{M_{\text{solo saturado}} - M_{\text{solo seco}}}{V_{\text{cilindro}}}$$

Onde M solo saturado foi obtida através da pesagem da amostra à saída do permeâmetro após uma hora de drenagem, M solo seco foi o resultado da pesagem depois de secagem da amostra na estufa a 105°C até peso constante (durante pelo menos 24h) e V cilindro = $A * L$.

4.4.4 Microporosidade e macroporosidade

A microporosidade (MicroP) é a expressão volumétrica do teor de humidade, calculada por:

$$\%MicroP = \%CC \times Dap$$

A macroporosidade (MacroP) foi estimada por diferença entre a porosidade total (P) e a microporosidade (MicroP):

$$\%MacroP = P - MicroP$$

4.4.5 Capacidade de campo e capacidade máxima para a água

Por fim, as amostras foram deixadas para drenar durante um período de 24 horas, permitindo que o teor de humidade atingisse um nível equivalente à capacidade de campo do solo (CC). Isso representa uma estimativa da quantidade de água retida nos microporos do solo (Figueiredo, 2013).

O teor de humidade foi determinado com base na diferença entre o peso da amostra nessas condições (M solo húmido) e o peso após a secagem completa da amostra em estufa a 105 °C (M solo seco).

$$\%CC = 100 \times \frac{M \text{ solo húmido} - M \text{ solo seco}}{M \text{ solo seco}}$$

A capacidade máxima para água (CMA) foi determinada da seguinte forma:

$$\%CMA = 100 \times \frac{M \text{ solo saturado} - M \text{ solo seco}}{M \text{ solo seco}}$$

4.4.6 Estabilidade dos agregados

A avaliação da estabilidade dos agregados foi realizada usando um estabilizador de agregados e aplicando o método de peneiramento húmido (wet sieving) (Figura 11). Este

equipamento simula forças mecânicas e físico-químicas através de movimentos de subida e descida, expondo os agregados à água destilada e depois a uma solução dispersante de hexametáfosfato de sódio. Isso permite diferenciar entre agregados instáveis e estáveis.

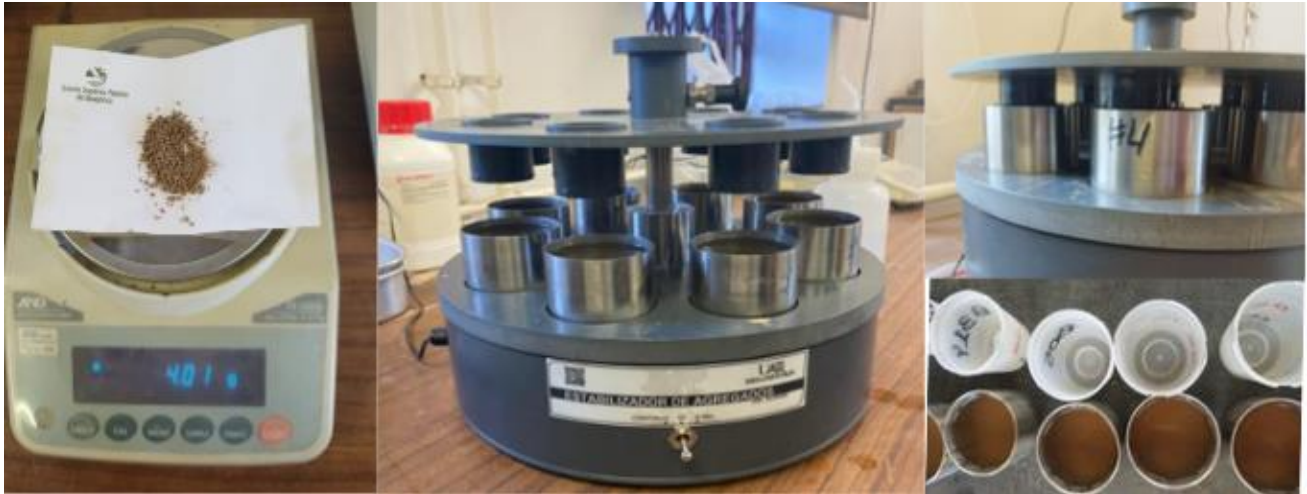


Figura 11. Estabilizador de Agregados utilizado na determinação da estabilidade de agregados.

Fonte: Keller (2024).

Duas classes de tamanho de agregados foram estabelecidas: uma corresponde a agregados de 0,4 mm e outra a agregados de 0,25 mm. A última classe (0,25 mm) representa a transição entre macroagregados (>0,25 mm) e microagregados (0,20-0,25 mm). Assim, para avaliar a estabilidade dos agregados nas amostras de solo, foram usadas peneiras com malha de 0,4 mm e 0,25 mm, para uma e outra classe de agregados, respectivamente. Os testes foram realizados separadamente, primeiro para a classe maior (peneira de 0,4 mm) e depois para a classe menor (peneira de 0,25 mm). O equipamento pode analisar até 8 amostras de uma vez.

Utilizaram-se amostras de aproximadamente 4 g de solo cada, com quatro repetições por amostra. Após a extração do equipamento, os conteúdos foram colocados em recipientes plásticos e levados a uma estufa para secar a 105 °C por 24 horas.

Agregados em contato com água destilada

Foram adicionados 100 ml de água destilada aos recipientes metálicos acoplados ao equipamento. As amostras de solo foram colocadas nas peneiras correspondentes a cada teste (0,4 mm ou 0,25 mm). As peneiras foram então submersas na água destilada e o equipamento foi ligado para realizar movimentos de subida e descida por 3 minutos. Depois,

as peneiras foram elevadas para escorrer a água, e os recipientes contendo partículas instáveis foram retirados do equipamento e deixados para decantar por 15 minutos. Depois deste processo, foram removidos entre 20 e 40 ml de água e o conteúdo foi transferido para potes plásticos identificados e colocados a secar na estufa a 105 °C por 24 horas.

Agregados em contacto com a solução dispersante de hexametáfosfato de sódio

Os recipientes metálicos foram preenchidos com 100 ml de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio (4 g de hexametáfosfato de sódio para 2 litros de água destilada). As peneiras com as amostras de solo foram submersas na solução e o equipamento foi ligado por 8 minutos. Após esse tempo, a plataforma foi elevada e, com a ajuda de um bastão de vidro, uma pressão foi aplicada às amostras. A plataforma foi então baixada novamente, e o equipamento operou por mais 3 minutos. Os recipientes com as partículas estáveis foram retirados e deixados para sedimentar por 15 minutos, após o que 20 a 40 ml de líquido foram removidos e o conteúdo transferido para potes plásticos identificados e colocados para secar na estufa a 105 °C por 24 horas.

Após 24 horas, os recipientes foram retirados da estufa e pesados para obter o peso seco final de cada amostra. Isso permitiu calcular a estabilidade da agregação e das partículas primárias.

Cálculo da estabilidade da agregação (EA):

$$EA(\%) = \frac{Pfs}{Pf_{H_2O} + Pfs} \times 100$$

Cálculo das partículas primárias (PP):

$$PP(\%) = \frac{Pi - (Pf_{H_2O} + Pfs)}{Pi} \times 100$$

Pfs – Peso final da amostra seca, em gramas, após o processo de dispersão na solução dispersante.

Pf_{H_2O} – Peso final da amostra seca, em gramas, após o processo de dispersão em água destilada.

Pi – Peso, em gramas, da amostra inicial colocada no crivo (4 g).

4.5 Determinação de propriedades químicas do solo

4.5.1 Carbono e azoto do solo

As amostras de solo foram primeiramente submetidas a um processo de secagem a uma temperatura de 45 °C. Após a secagem, o solo foi peneirado utilizando um crivo de malha de 2 mm para garantir a homogeneidade das amostras.

As amostras peneiradas foram cuidadosamente organizadas e rotuladas para garantir sua identificação precisa. Em seguida, foram enviadas ao Laboratório de Solos da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) para a análise dos teores de carbono orgânico e azoto total presentes no solo.

As análises foram realizadas utilizando um analisador elementar. Este procedimento envolve a combustão das amostras a 1000°C, com a detecção dos elementos por diferentes métodos: para o carbono (C) foi utilizado um detetor de infravermelhos próximos (NIRD), e para o azoto (N) foi aplicada a técnica de quimiluminescência. Esses métodos garantem uma medição precisa dos teores de carbono e azoto nas amostras de solo.

4.6 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando os resultados mostraram significância, aplicou-se o teste de comparação de médias de Scott-Knott ($p < 0,05$). Nos casos em que os dados não atenderam às premissas de normalidade, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, também no mesmo programa, para realizar as correções necessárias.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades físicas do solo

5.1.1 Densidade aparente do solo

Uma menor densidade aparente do solo é desejável, pois está associada a uma estrutura mais adequada, maior porosidade e, conseqüentemente, melhor infiltração de água, favorecendo o desenvolvimento radicular e a saúde das plantas. Em Leptosolos sob cultivo de oliveiras, a densidade aparente ideal varia de 1,1 a 1,4 g/cm³, intervalo que promove uma boa combinação entre aeração, retenção de água e crescimento das raízes, sem compactação excessiva (Lupián-Machuca et al., 2024).

Ao analisarmos a Figura 12 (tratamentos com trevos subterrâneos), observamos que o solo do tratamento TS+cRQ e TS+cRRA se destacam ao apresentar uma densidade aparente dentro desse intervalo ideal, o que reflete uma maior porosidade do solo. Estes tratamentos apresentam diferenças estatisticamente significativas em relação ao solo original (SO), pelo que as cepas RQ e RRA mostraram condições mais favoráveis, refletindo uma melhoria na estrutura do solo e em suas características funcionais.

Este resultado é corroborado pelo estudo de Santos (2019), que demonstrou uma relação inversa entre o coeficiente de permeabilidade (K) e a densidade aparente (Dap) em solos de Trás-os-Montes, indicando que solos com menor densidade aparente apresentam maior capacidade de infiltração de água. De forma complementar, Ramos et al. (2016) ressalta que uma densidade aparente elevada reduz o volume de espaços vazios, prejudicando a retenção de água e, conseqüentemente, a eficiência hídrica do solo. Dessa forma, os resultados dos tratamentos TS+cRQ e TS+cRRA reforçam que uma densidade aparente mais baixa está diretamente associada a uma maior permeabilidade e a um solo mais funcional, promovendo um ambiente mais adequado para o desenvolvimento vegetal.

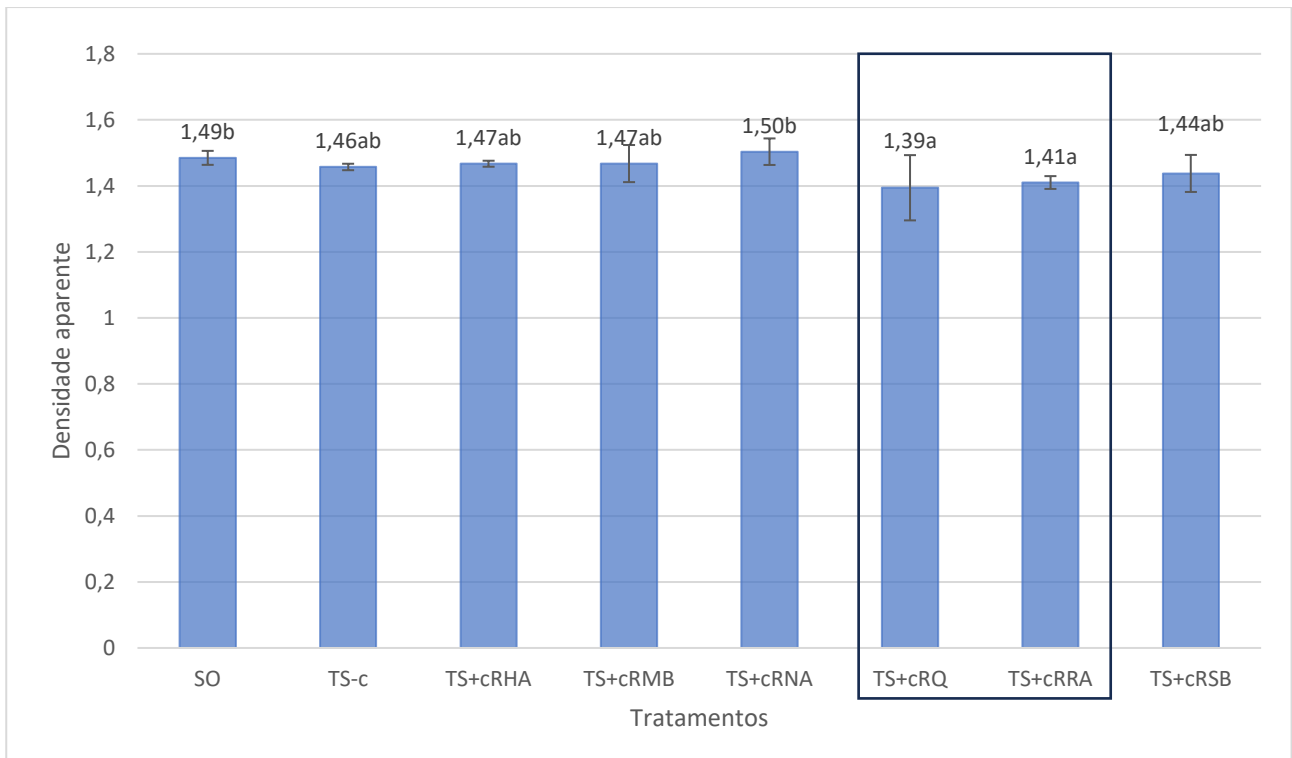


Figura 12. Densidade aparente do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

A Figura 13 expressa os valores de Dap dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE). Levando em consideração que a densidade aparente ideal se encontra entre 1,1 e 1,4 g/cm³, pode-se observar que o tratamento TE+cRRA obedece a esse critério, com um valor estatisticamente inferior ao do solo original (SO). Neste contexto, o tratamento TE+cRRA proporciona uma estrutura de solo mais favorável à infiltração de água e ao desenvolvimento das plantas, oferecendo melhores condições para a saúde do solo e o crescimento e produção das oliveiras.

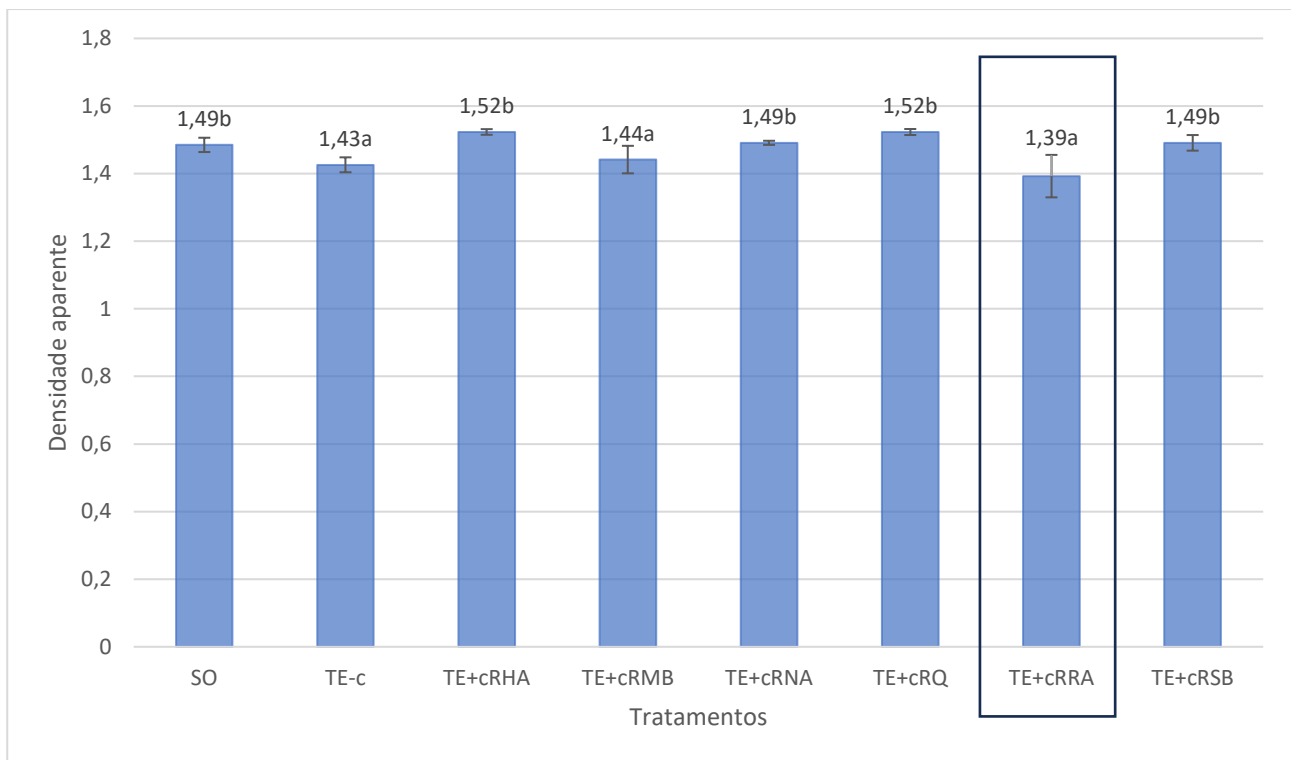


Figura 13. Densidade aparente do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

A Figura 14 mostra a combinação de trevos subterrâneos e trevos de porte ereto. A cepa RRA (TS+TE+cRRA) destacou-se significativamente entre os tratamentos avaliados. Essa cepa já havia demonstrado um desempenho superior nos tratamentos com apenas trevos subterrâneos ou trevos de porte ereto, e a mistura das duas espécies de trevos potencializou ainda mais suas características benéficas. O tratamento TS+TE+cRRA apresentou uma redução de 9,2% na densidade aparente em comparação ao valor obtido com os trevos subterrâneos (TS+cRRA, Figura 12) e de 7,9% em relação aos trevos de porte ereto (TE+cRRA, Figura 13), o que indica um resultado promissor da mistura das espécies de trevos na qualidade do solo.

Essa diminuição na densidade aparente não apenas favoreceu a aeração e a infiltração de água, mas também criou um ambiente mais saudável para o desenvolvimento das raízes. A maior porosidade do solo favorece as trocas gasosas e promove a atividade microbiana, essenciais para a saúde do solo. Assim, o tratamento TS+TE+cRRA vem

reforçar a eficácia da cepa RRA, mas também exemplifica como a combinação de diferentes espécies de trevos pode otimizar as condições do solo.

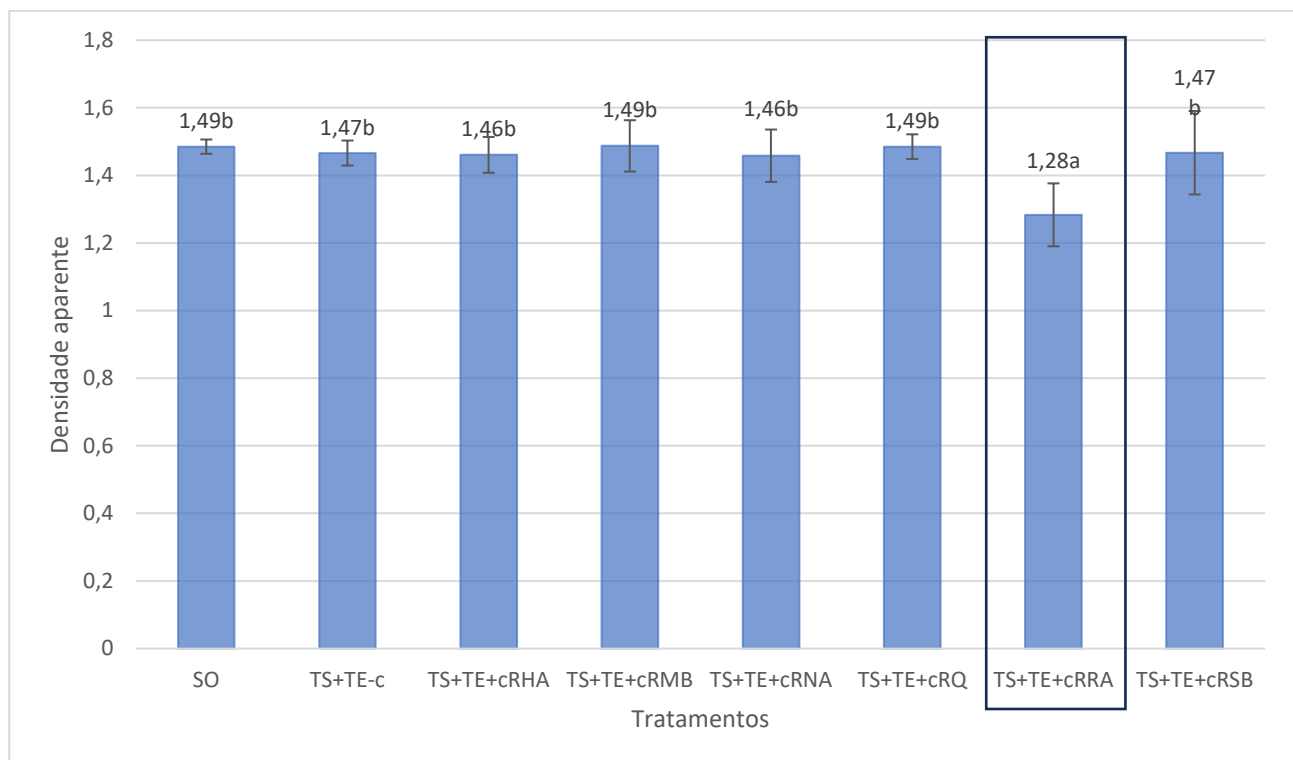


Figura 14. Densidade aparente do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

5.1.2 Porosidade total, microporosidade e macroporosidade

Na Figura 15 expressam-se os valores da porosidade total (valores no cimo das colunas), da microporosidade e da macroporosidade para os tratamentos com trevos subterrâneos (TS). A porosidade total do solo, em todos os tratamentos inoculados, registou um incremento em relação ao solo original (SO), com variações nos incrementos de 0,5% (TS+cRRA) a 2,7% (TS+cRSB). O tratamento sem inoculação (TS-c) foi o que apresentou o menor valor (43,8%). Esse aumento indica que os tratamentos aplicados promoveram uma maior formação de espaços porosos no solo, o que pode resultar em melhorias na infiltração e retenção de água, aeração, entre outras. Quando comparados os tratamentos com inoculação ao tratamento sem inoculação (TS-c), o aumento na porosidade total foi ainda mais acentuado, variando de 2,8% (TS+cRRA) a 5,0% (TS+cRSB). Isso sugere que,

apesar da ausência de diferenças significativas, os trevos subterrâneos inoculados com cepas de rizóbios influenciaram positivamente o volume de poros do solo.

Os tratamentos inoculados, com exceção de TS+RHA e TS+RMB, apresentam valores de macroporosidade inferiores ao do tratamento sem inoculação (TS-c). A macroporosidade tem um papel fundamental na circulação de ar e na drenagem do solo, fatores essenciais para o desenvolvimento das raízes e o crescimento saudável das plantas. Já a microporosidade aumentou em todos os tratamentos inoculados com cepas de rizóbio, comparativamente ao tratamento sem inoculação (TS-c). Este aumento é importante, pois está associado à retenção de água, favorecendo o crescimento microbiano e a disponibilidade hídrica para as plantas em períodos de baixa precipitação.

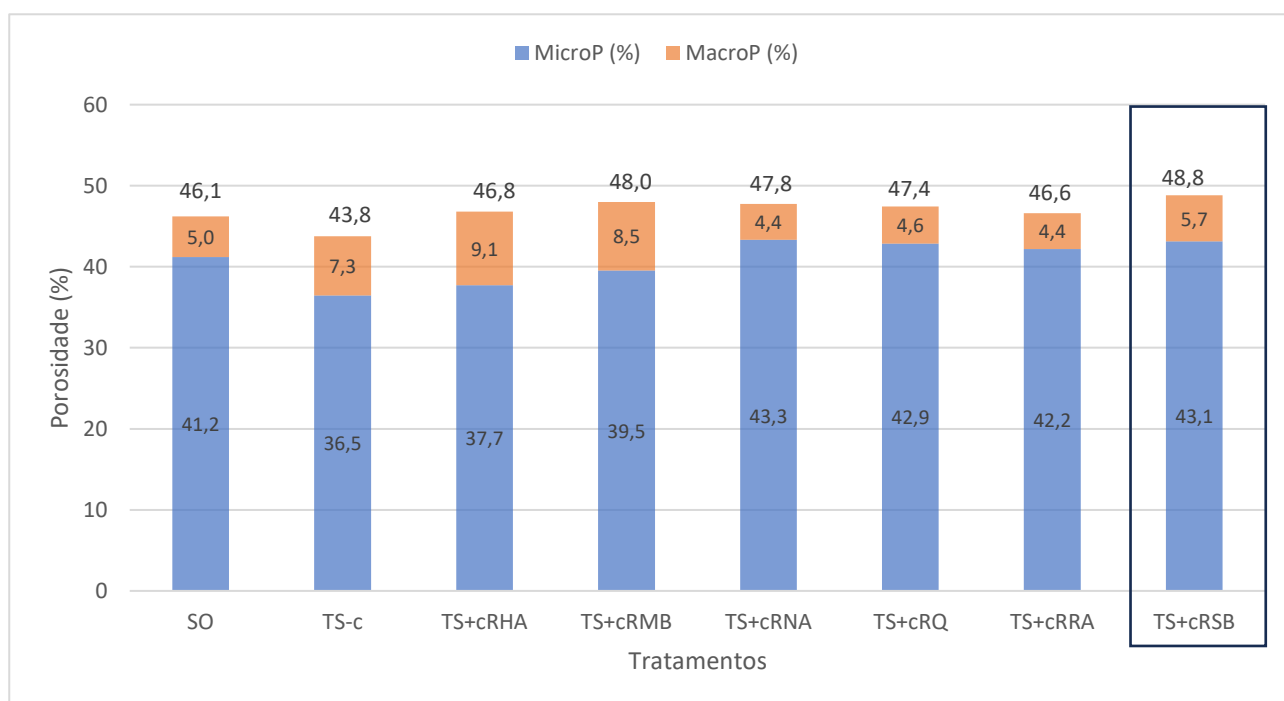


Figura 15. Porosidade (P), macroporosidade (MacroP), microporosidade (MicroP) do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□).

Na Figura 16, podemos observar a porosidade total do solo (valores no cimo das colunas), a macroporosidade e a microporosidade dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE). Tal como verificado para os tratamentos com trevos subterrâneos (TS), a inoculação dos trevos de porte ereto, globalmente, também aumentou a porosidade total do solo em relação ao solo original (SO) e ao tratamento sem inoculação (TE-c), mas sem diferenças estatísticas entre tratamentos.

Também a macroporosidade seguiu o mesmo padrão apresentado pelos trevos subterrâneos, mas com valores superiores, mas mesmo assim inferiores ao do tratamento sem inoculação (TE-c), excetuando os tratamentos TE+cRHA e TE+cRMB. Quanto à microporosidade, esta mantém uma tendência de aumento em quase todos os tratamentos inoculados, com destaque para TE+cRRA e TE+cRSB. Esses resultados indicam que os tratamentos com trevos de porte ereto têm um impacto positivo no volume de poros do solo, melhorando a infiltração e a retenção de água, essenciais para o desenvolvimento das plantas.

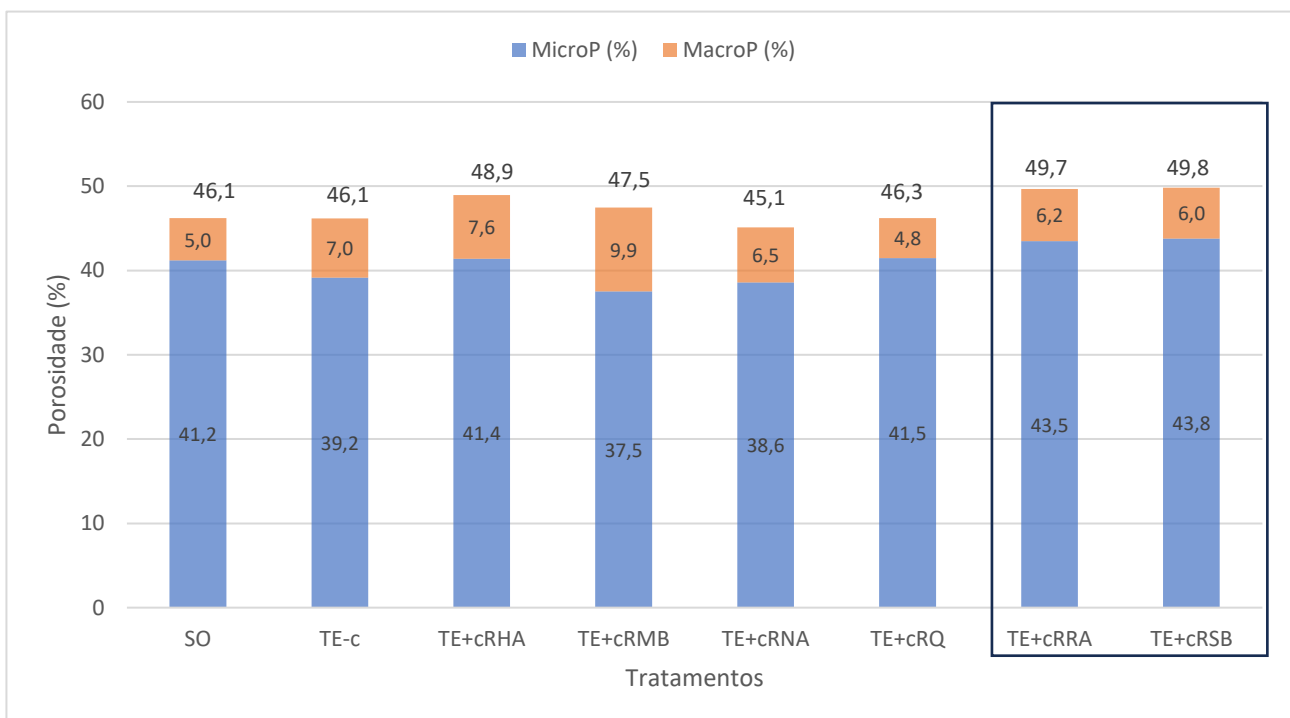


Figura 16. Porosidade (P), macroporosidade (MacroP), microporosidade (MicroP) do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□).

Analisando a Figura 17, podemos observar que a mistura das duas espécies de trevos com inoculação (trevos subterrâneos + trevos de porte ereto), continua a favorecer a porosidade total do solo, particularmente as cepas cRRA e cRSB, comparativamente ao solo original (SO). Em relação à macroporosidade e microporosidade, seguiram padrões muito similares aos já indicados para os tratamentos com trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE).

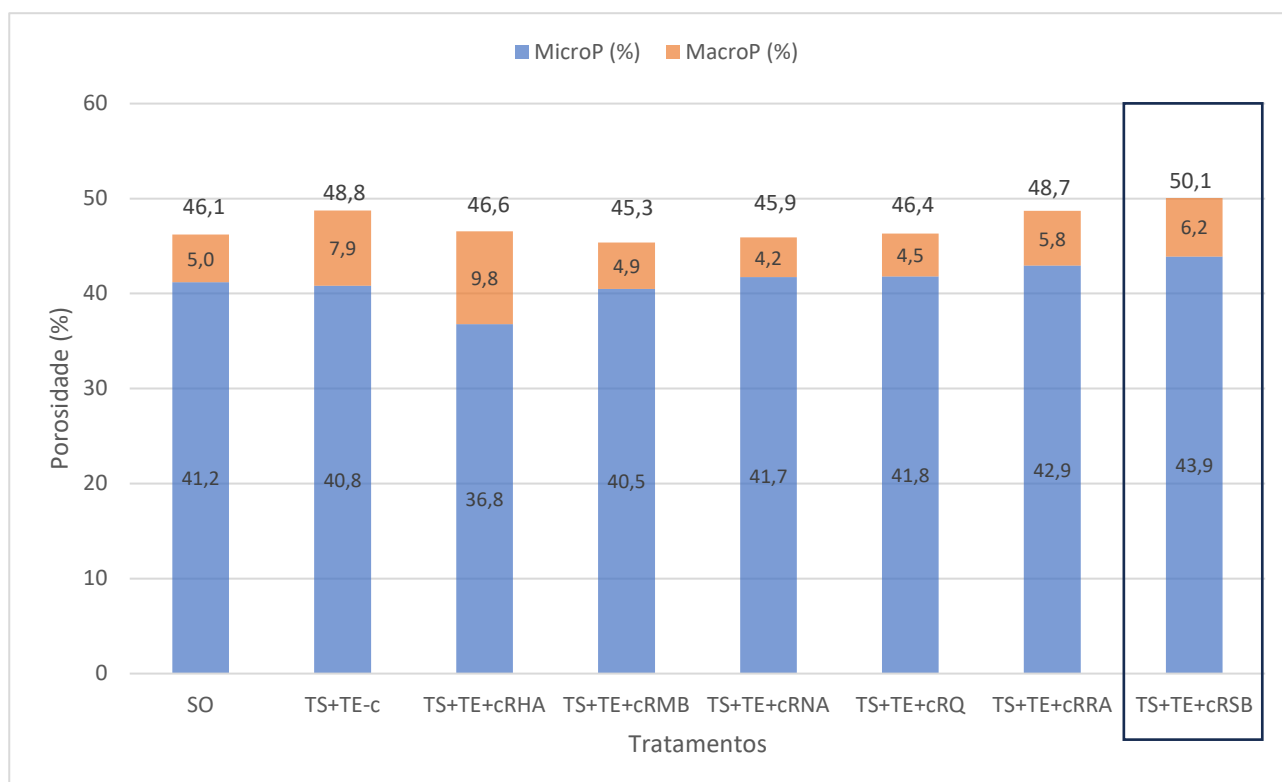


Figura 17. Porosidade (P), macroporosidade (MacroP), microporosidade (MicroP) do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□).

Apesar da ausência de diferenças estatisticamente significativas para todos os tratamentos e tipos de porosidade, de um modo geral, os pequenos aumentos verificados nos tratamentos inoculados com cepas de rizóbio podem resultar em importantes benefícios nas funções do solo.

5.1.3 Permeabilidade do solo

O coeficiente de permeabilidade dos solos (K) é uma medida fundamental que expressa a capacidade de o solo permitir a passagem da água por entre seus poros. Está diretamente relacionado à velocidade com que a água se desloca no interior do solo, influenciando, de forma significativa, as taxas de infiltração e drenagem. Quanto maior o coeficiente de permeabilidade, mais rapidamente a água consegue se movimentar pelos poros, o que afeta diretamente o comportamento do escoamento superficial. Solos com alta permeabilidade permitem maior infiltração, reduzindo o escoamento superficial, enquanto

solos de baixa permeabilidade tendem a reter mais água na superfície, aumentando o risco de acúmulo e escoamento. Portanto, o coeficiente de permeabilidade é um fator crucial para a análise de processos hídricos no solo, interferindo no manejo da água e na dinâmica das chuvas (Caputo, 1988; Figueiredo, 2011).

Conforme Oliveira & Melo (1970), solos com permeabilidade rápida a muito rápida podem causar maior lixiviação de nutrientes do horizonte superior, resultando na perda de elementos fertilizantes aplicados e na falta de retenção de água. Tendo isso em mente, a classe que tem maior vantagem para que as plantas possam absorver maior quantidade de água e nutrientes, é a classe de permeabilidade moderada (entre 2,00 e 6,35 cm/h). Nesse sentido, os tratamentos TS+cRHA, TS+cRQ e TS+cRRA (Figura 18), estão dentro desses intervalos, permitindo uma infiltração eficiente sem comprometer a disponibilidade de água necessária ao desenvolvimento das plantas. Já os tratamentos SO (solo original), TS-c (sem inoculação), TS+cRMB, TS+cRNA e o TS+cRSB apresentaram comportamento estatisticamente semelhante com permeabilidades considerada moderadamente lenta (entre 0,50 e 2,00 cm/h). O acúmulo de água na superfície pode causar uma série de problemas, tanto para o cultivo quanto para o manejo das áreas plantadas (Rusdi et al., 2015). A estagnação da água, comum nesses solos, prejudica o desenvolvimento das oliveiras, pois o excesso de umidade no solo compromete a oxigenação das raízes, levando ao estresse das plantas e aumentando a vulnerabilidade a doenças fúngicas.

As raízes, ao crescerem, criam bioporos no perfil do solo, que ao aumentarem a porosidade, facilitam o movimento da água e promovem uma maior retenção de umidade, essencial para o crescimento vegetal (Frasca et al., 2021; Carvalho et al., 2022). Tratando-se do mesmo solo, clima e espécies de trevos utilizados, as diferenças observadas podem dever-se à natureza da cepa utilizada em cada tratamento.

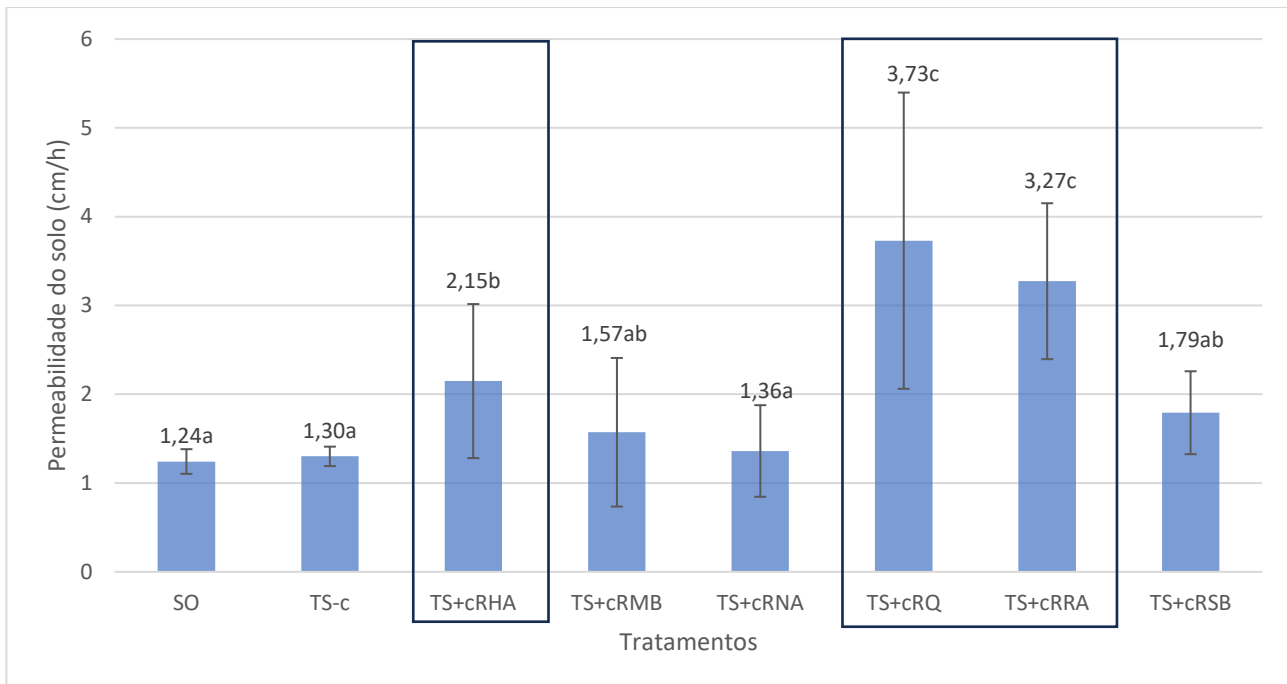


Figura 18. Coeficiente de permeabilidade do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

Na Figura 19, observa-se que os tratamentos de trevos de porte ereto, nomeadamente os tratamentos TE+cRHA, TE+cRMB e TE+cRRA, destacaram-se por apresentar taxas de infiltração dentro da faixa moderada (entre 2,00 e 6,35 cm/h). Esses resultados indicam uma boa correlação entre a infiltração e a retenção de água, sugerindo que esses solos têm uma capacidade equilibrada de permitir a passagem de água ao mesmo tempo em que retêm uma quantidade adequada para o uso das plantas. Esse nível de infiltração é essencial para criar um ambiente que favoreça o desenvolvimento radicular e o crescimento saudável dos olivais, pois previne tanto a saturação excessiva quanto o ressecamento rápido do solo, para além de contribuir para a redução dos processos erosivos.

Por outro lado, os tratamentos SO, TE-c, TE+cRNA, TE+cRQ e TE+cRSB apresentaram permeabilidade considerada moderadamente lenta (entre 0,50 e 2,00 cm/h), com comportamento estatisticamente semelhante. Esses resultados indicam uma menor taxa de infiltração em comparação aos tratamentos anteriores, o que pode impactar a disponibilidade de água para as plantas em períodos de seca ou quando o solo recebe grandes volumes de água.

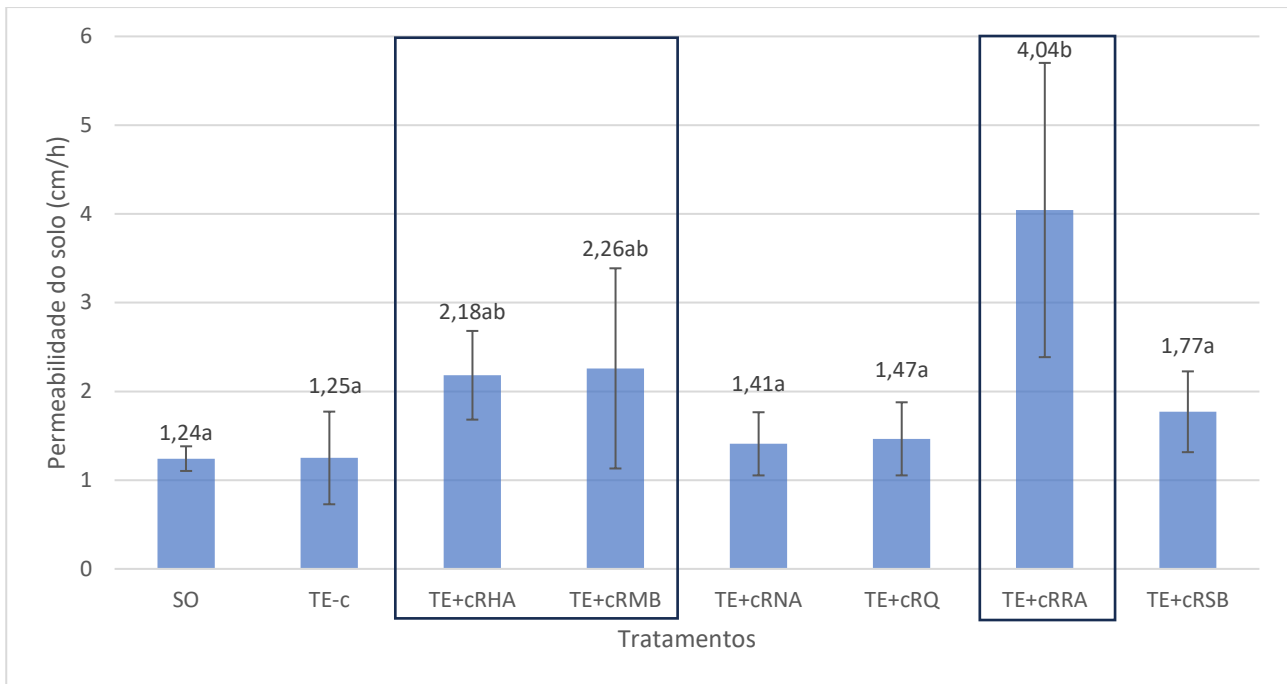


Figura 19. Coeficiente de permeabilidade do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

Na Figura 20 podemos observar que, de um modo geral, a mistura de trevos subterrâneos com trevos de porte ereto favoreceu a permeabilidade do solo. A maioria dos tratamentos se encontra na classe de permeabilidade moderada (entre 2,00 e 6,35 cm/h), o que indica uma relação favorável entre a retenção de água e a infiltração. Grande parte desses tratamentos combina trevos com cepas de rizóbios, mostrando que essa associação tende a melhorar as características de permeabilidade do solo. Por outro lado, os tratamentos SO, TS+TE+cRMB e TS+TE+cRNA apresentaram permeabilidade considerada moderadamente lenta (entre 0,50 e 2,00 cm/h), com comportamento estatisticamente semelhante entre eles.

A combinação dos trevos subterrâneos com os trevos de porte ereto melhorou a permeabilidade do solo comparativamente aos tratamentos que incluíram de forma isolada os trevos subterrâneos (Figura 18) e os trevos de porte ereto (Figura 19).

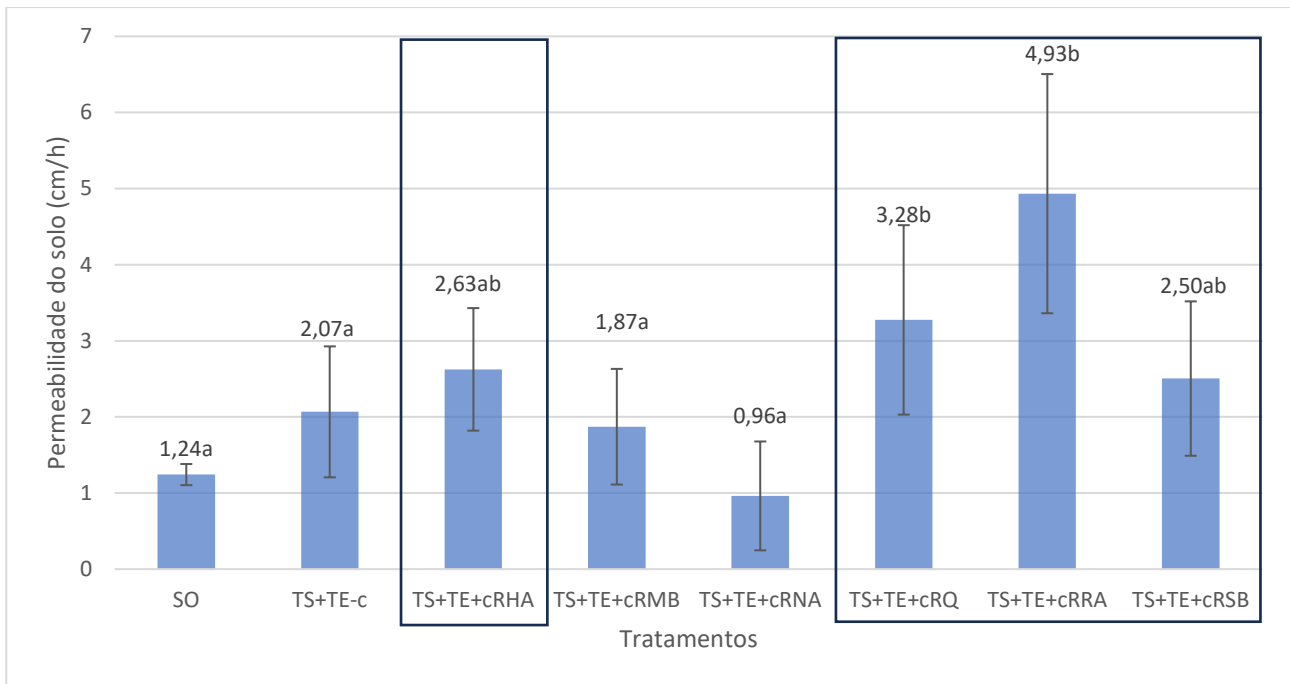


Figura 20. Coeficiente de permeabilidade do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

5.1.4 Capacidade máxima para a água e capacidade de campo

Os valores da capacidade máxima para a água (CMA) e da capacidade de campo (CC) dos tratamentos com trevos subterrâneos são apresentados na Figura 21. Observa-se que a maioria dos tratamentos com trevos subterrâneos inoculados, apresentam médias de CMA e de CC superiores aos tratamentos SO (testemunha) e TS-c (sem inoculação). Esse aumento nas médias, apesar de não ser estatisticamente significativo, indica que a cobertura do solo com plantas herbáceas, como os trevos subterrâneos, pode proporcionar uma melhora nas propriedades do solo, especialmente no que tange à sua capacidade de retenção de água, fator essencial tende em consideração as condições climáticas registradas na área de estudo. Essa capacidade de retenção é crucial para o desenvolvimento das culturas, uma vez que permite que o solo armazene mais água por períodos mais longos, beneficiando o crescimento das plantas e tornando o sistema mais resiliente a períodos de baixa precipitação.

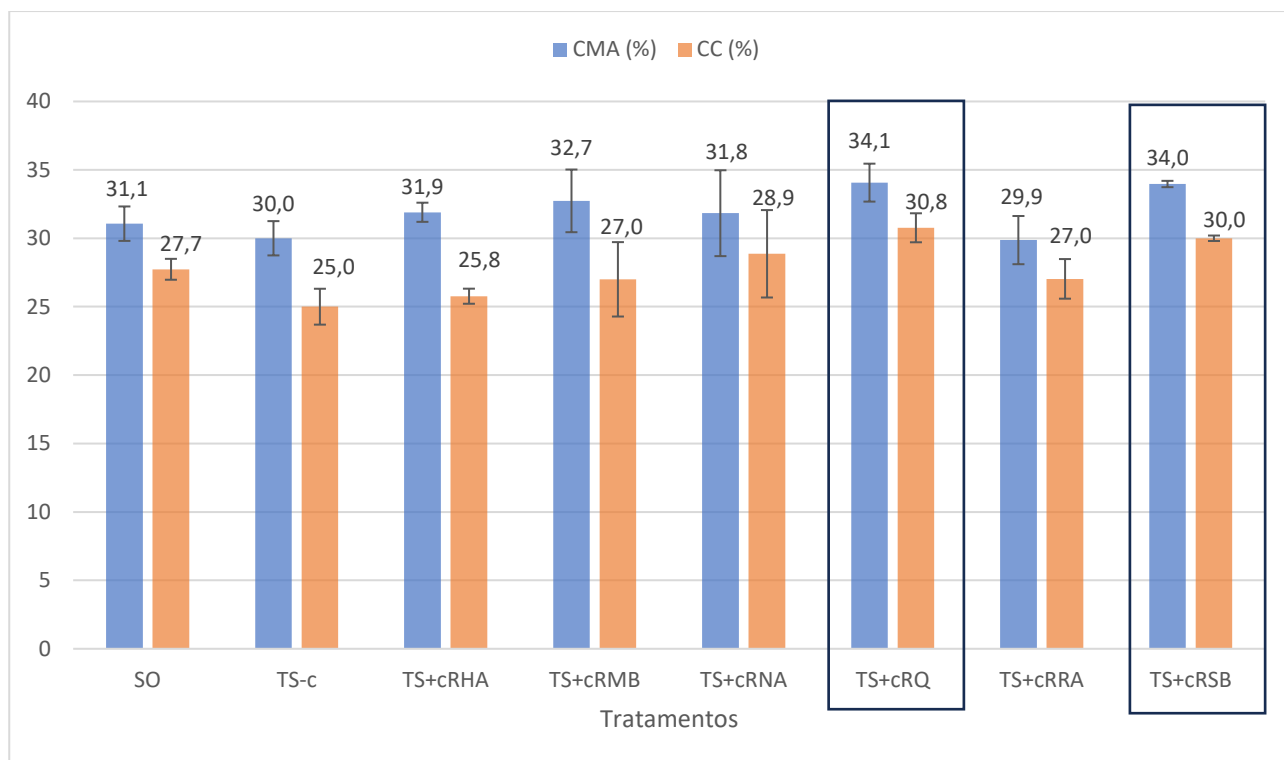


Figura 21. Capacidade máxima para a água (CMA) e capacidade de campo (CC) do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□).

A tendência positiva no aumento da retenção de água em solos cobertos com vegetação foi também destacada por Santos (2019), que aponta as coberturas vegetais como fundamentais para a conservação da umidade do solo, contribuindo assim para uma agricultura mais sustentável e menos dependente de irrigação suplementar. De acordo com Carvalho et al. (2020), esse aumento na capacidade de retenção de água, promovido pelo uso de coberturas verdes, se deve principalmente à presença e ao crescimento de raízes diversificadas que, ao se expandirem pelo solo, induzem alterações estruturais, gerando uma rede porosa. Essas raízes aumentam a porosidade total do solo, criando canais e agregados que favorecem a infiltração de água e sua retenção por períodos prolongados.

Da análise da Figura 22, observamos tendências semelhantes entre os tratamentos com trevos de porte ereto e os de trevos subterrâneos, mas com uma diferença mais acentuada nos tratamentos TE+cRRA e TE+cRSB. Esses resultados reforçam as vantagens do uso de trevos inoculados como plantas de cobertura, destacando os benefícios adicionais da inoculação para a melhoria das propriedades do solo. Ao compararmos com a Figura 21, também percebemos que a cepa RSB apresentou desempenho consistente,

com melhores resultados tanto para trevos de porte ereto (TE) quanto para os subterrâneos (TS).

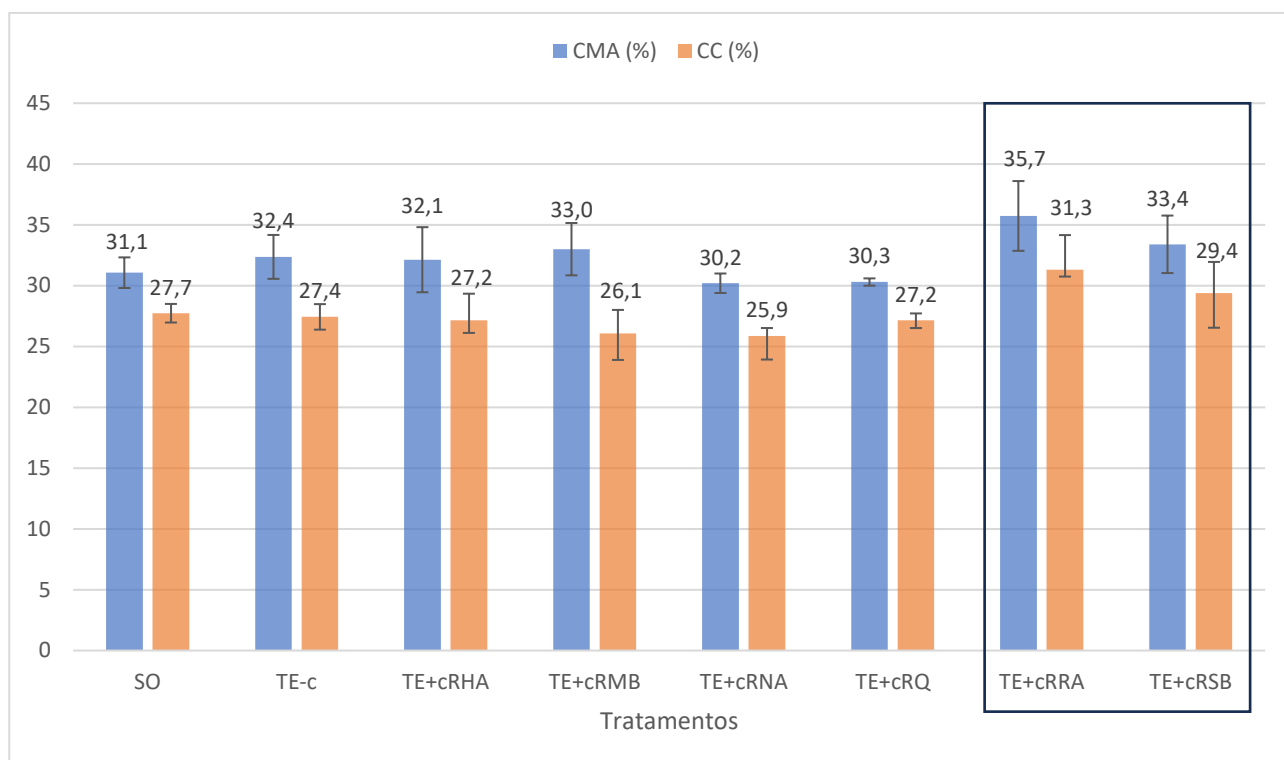


Figura 22. Capacidade máxima para a água (CMA) e capacidade de campo (CC) do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□).

A Figura 23 (tratamentos com mistura de trevos subterrâneos e trevos de porte ereto), revela uma resposta ainda mais eficaz das cepas RRA e RSB, que já haviam demonstrado destaque nas Figuras 21 (TS) e 22 (TE). Observamos que a combinação de trevos subterrâneos e de porte ereto, ambos inoculados com essas cepas, potencializa as melhores características de ambos os tipos de trevos. Essa mistura maximiza os benefícios proporcionados pelas cepas RRA e RSB, indicando que a combinação de diferentes tipos de trevos inoculados pode oferecer vantagens significativas para as propriedades do solo.

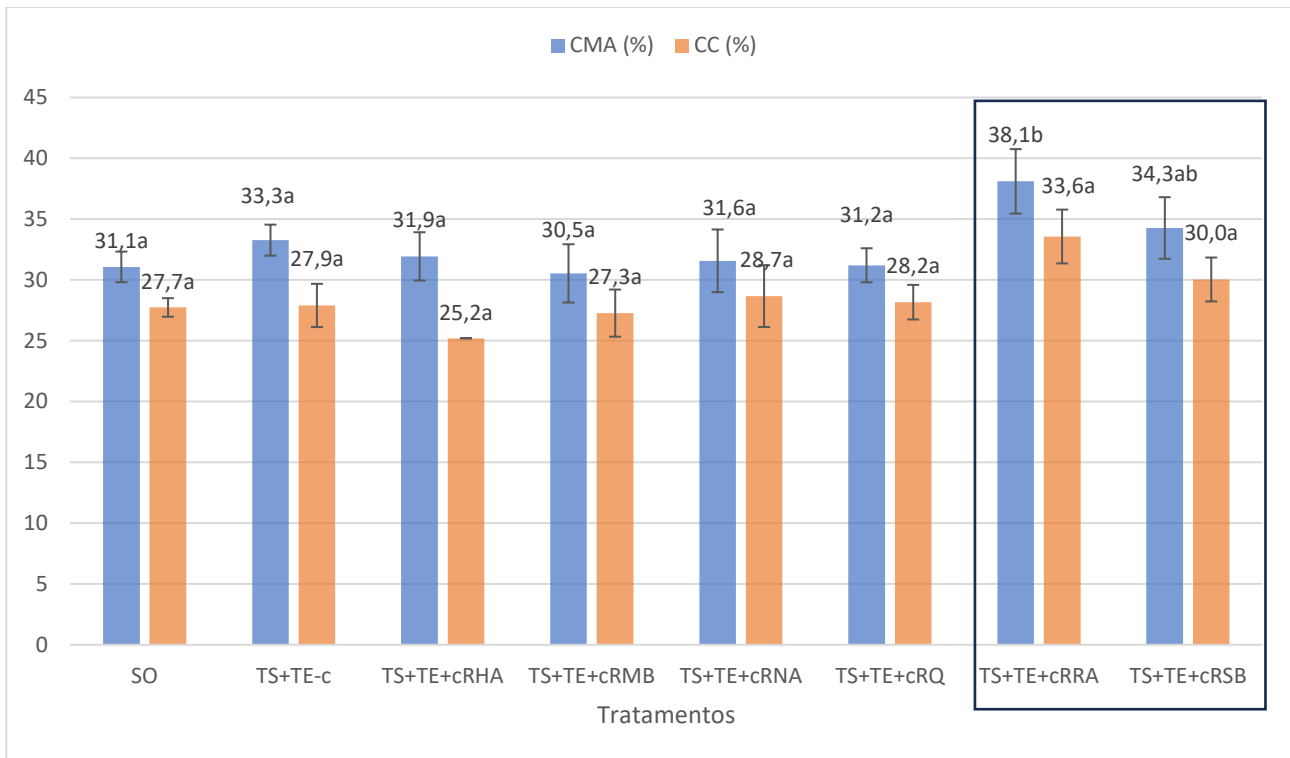


Figura 23. Capacidade máxima para a água (CMA) e capacidade de campo (CC) do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

5.1.5 Estabilidade dos agregados do solo

A estabilidade dos agregados do solo refere-se à capacidade do solo resistir à ação de desagregação pela água, seja por precipitação intensa ou irrigação. Agregados estáveis conseguem manter a sua coesão e estrutura, evitando que as partículas finas, como o silte e a argila, se libertem e se dispersem. Quando essas partículas finas se separam, podem migrar e acumular-se nos poros do solo, provocando a sua obstrução e limitando a infiltração e circulação de água e ar. Esta obstrução reduz a aeração do solo, diminui a disponibilidade de água para as plantas e compromete a eficiência da drenagem, afetando diretamente a saúde e a produtividade das culturas. Assim, a preservação de agregados estáveis é fundamental para manter a estrutura do solo, prevenir a erosão e promover um ambiente edáfico adequado ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Pereira et al., 2020).

Na Figura 24 (tratamentos com trevos subterrâneos), podemos observar que os agregados de classe 0,25 mm (microagregados) apresentaram maior estabilidade nos tratamentos TS+cRMB, TS+cRQ e TS+cRSB, mostrando os agregados da classe 0,4 mm (macroagregados) um comportamento mais heterogêneo, registrando o tratamento TS+cRSB a maior estabilidade para esta classe. Esta maior resistência dos microagregados, sugere que a interação entre as cepas de rizóbios e o solo contribui para a formação de uma estrutura mais coesa das partículas menores, que se ligam de forma mais estável e duradoura. Essa estabilidade pode ser atribuída ao efeito de bioadesão gerado pela atividade microbiana e a produção de exsudatos, que facilitam a aglutinação das partículas de menor tamanho (Santos et al., 2019).

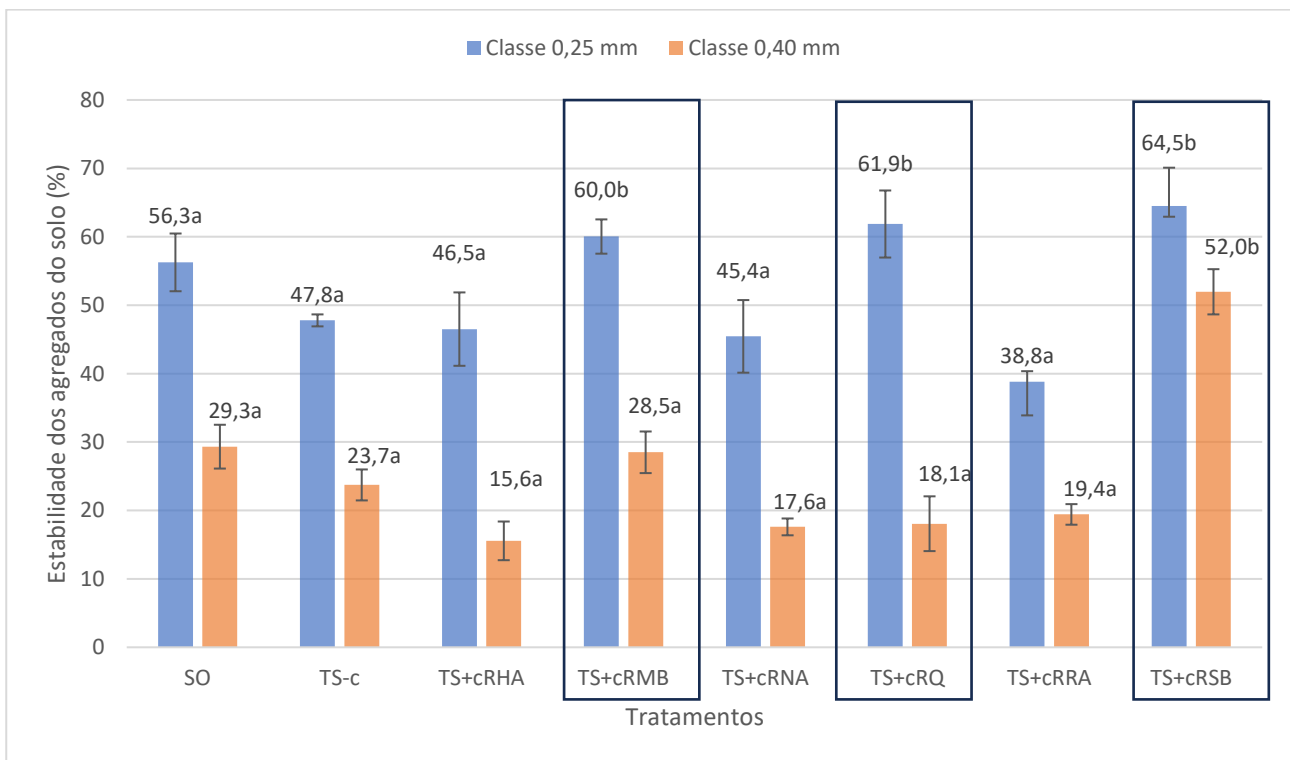


Figura 24. Estabilidade das classes de agregados do solo (classe 0,25 e classe 0,4 mm) dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

De forma geral, os resultados indicam que a inoculação de trevos subterrâneos com cepas de rizóbios tem um efeito benéfico na formação e resistência dos microagregados, essenciais para manter a integridade estrutural do solo e promover uma melhor retenção de umidade. Esse padrão de maior estabilidade nos microagregados também foi encontrado no estudo de Santos (2019).

Ao analisarmos a Figura 25, referente aos trevos de porte ereto, observamos que a estabilidade dos agregados na classe de 0,25 mm mostrou desempenho superior nos tratamentos TE+cRMB e TE+cRSB, registrando esta última diferença estatisticamente significativa em relação aos demais tratamentos. Na classe de agregados de 0,4 mm, os tratamentos TE+cRQ, TE+cRRA e TE+cRSB apresentaram os melhores resultados, demonstrando que essas cepas contribuíram para a formação de macroagregados mais resistentes e coesos.

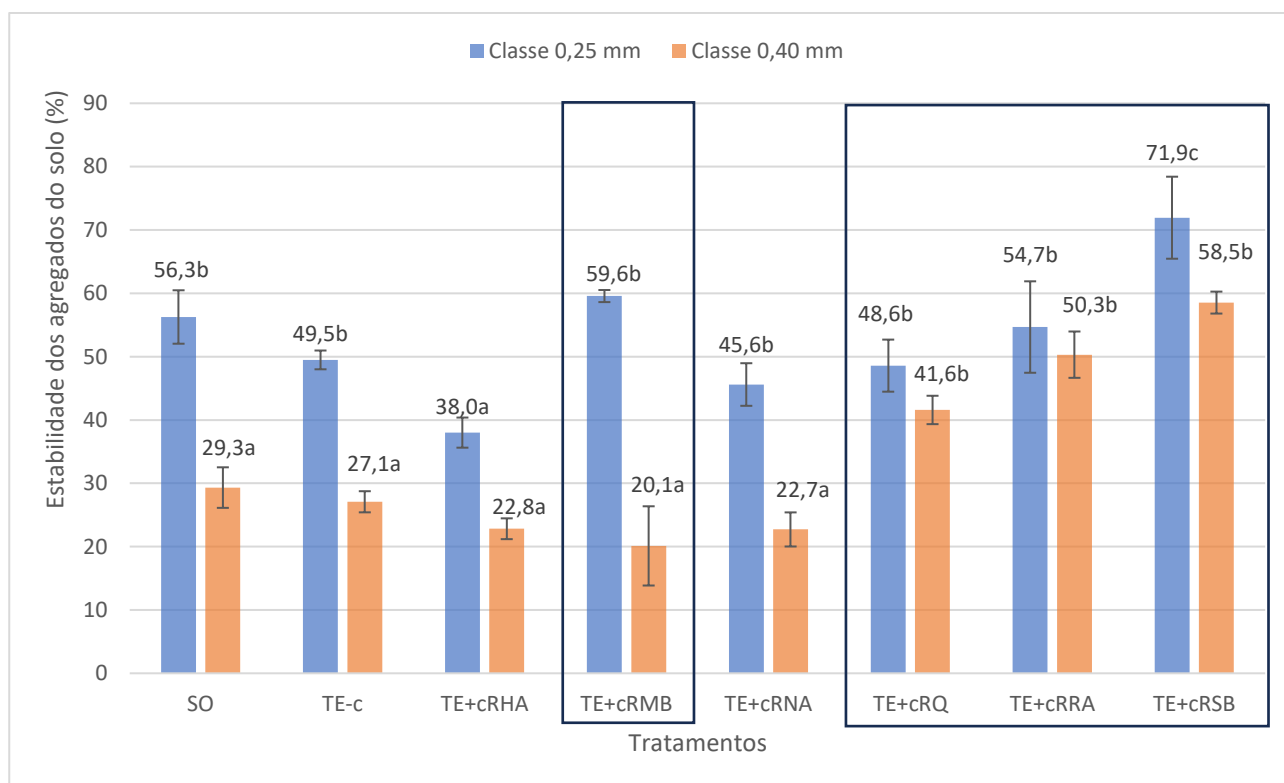


Figura 25. Estabilidade das classes de agregados do solo (classe 0,25 e classe 0,4 mm) dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

Da análise da Figura 26 (mistura das duas espécies de trevos, TS+TE), observamos que os tratamentos TS+TE+cRNA e TS+TE+cRSB apresentaram resultados mais expressivos tanto para a classe de 0,25 mm (microagregados) quanto para a classe de 0,4 mm (macroagregados). A cepa RSB, em particular, destacou-se consistentemente, não apenas nesse grupo específico de tratamentos, mas também nos outros dois grupos de trevos avaliados (TS e TE), indicando um desempenho robusto e eficaz na promoção da estabilidade dos agregados do solo.

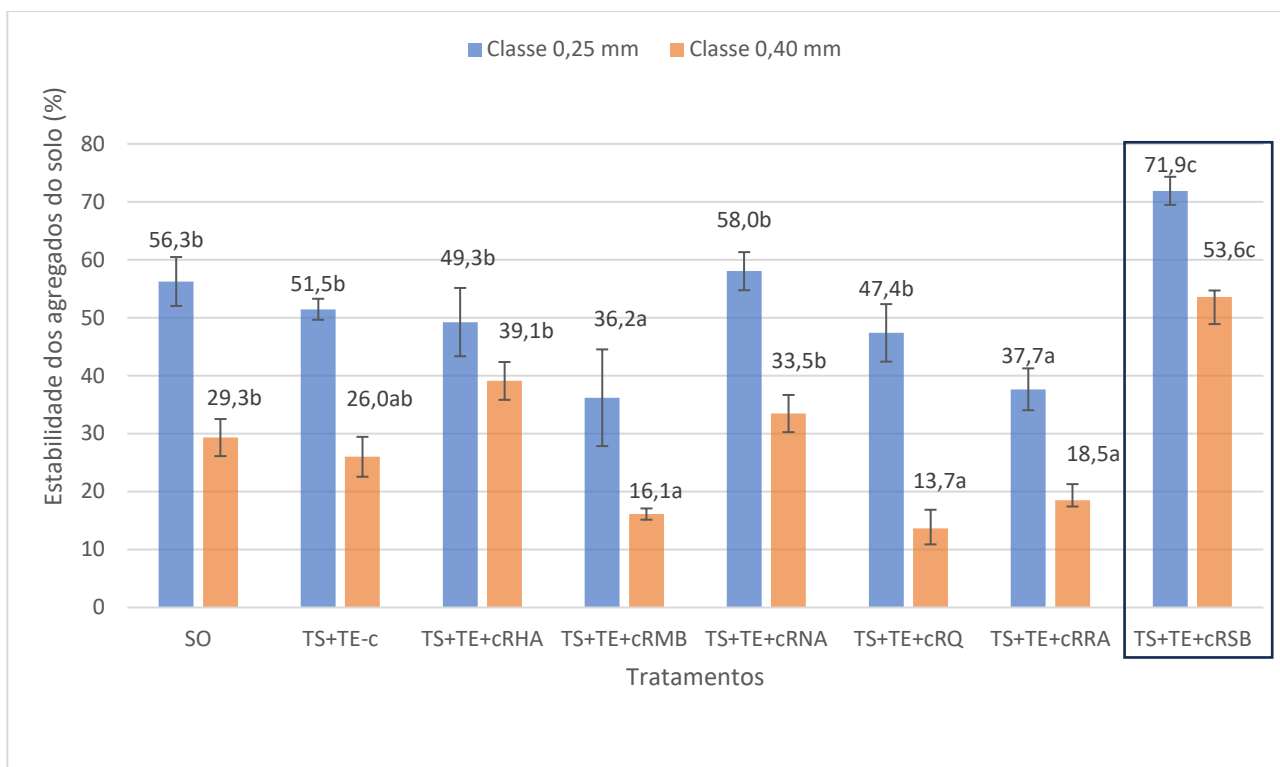


Figura 26. Estabilidade das classes de agregados do solo (classe 0,25 e classe 0,4 mm) dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

Os resultados revelam também que os microagregados apresentaram maior estabilidade em relação aos macroagregados, comportamento consistente nos três grupos de tratamentos com trevos inoculados (TS, TE e TS+TE). Os microagregados exercem papel fundamental na estabilidade do solo, pois são mantidos por materiais orgânicos duráveis e substâncias poliméricas. Essas substâncias, ao interagir com elementos temporários como raízes e hifas de fungos, favorecem a formação e a estabilidade dos macroagregados, contribuindo para a coesão do solo. Essa combinação de micro e macroagregados beneficia a estrutura do solo, pois os microagregados fornecem uma base estável, enquanto os macroagregados, formados ao redor deles, ajudam na retenção da matéria orgânica, promovendo a saúde do solo (Green et al., 2005; De Gryze et al., 2008; Anders et al., 2010., Costa Junior et al., 2012).

Além disso, os resultados mostram que a estabilidade dos microagregados (classe 0,25 mm) foi superior à dos macroagregados (classe 0,4 mm) em todos os tratamentos com a cepa RSB. Essa predominância sugere que a cepa RSB exerce uma influência

particularmente forte na coesão e durabilidade das partículas de menor tamanho, possivelmente devido à maior atividade biológica e à produção de exsudatos que favorecem a adesão das partículas menores. Segundo Bomfeti et al. (2011), "os rizóbios produzem uma grande diversidade de estruturas químicas de exopolissacarídeos, que são capazes de aumentar a adesão de partículas do solo. Esses compostos favorecem a estabilidade mecânica dos agregados, além de aumentarem os níveis de retenção de água e o fluxo de ar nesse ambiente." Essa capacidade dos exopolissacarídeos é crucial para a promoção da coesão das partículas do solo e para a melhoria das condições hídricas, refletindo-se na maior estabilidade dos agregados.

5.2 Propriedades Químicas do Solo

As propriedades químicas do solo estão aqui representadas pelos teores de carbono orgânico (C) e azoto total (N), determinados nos solos dos diversos tratamentos. Uma das propriedades das coberturas verdes é a habilidade de funcionarem como recicladoras de nutrientes do solo e sequestrar carbono a partir da atmosfera. No caso das leguminosas ainda acresce a fixação de N atmosférico no solo (Oliveira & Melo, 2014; Locatelli, 2018).

Na Figura 27 apresentam-se os dados do teor de azoto total e carbono orgânico para os tratamentos com trevos subterrâneos. Embora as diferenças entre os tratamentos não tenham sido estatisticamente significativas, observa-se uma tendência de aumento nos níveis de carbono orgânico nos tratamentos TS+cRNA, TS+RSB e TS+cRMB em comparação ao solo original (SO) e ao tratamento sem inoculação (TS-c). Quanto ao azoto total, todos os tratamentos com trevos inoculados demonstraram elevação em relação ao solo original (SO), sugerindo que a inoculação contribui para o aumento de azoto e, também de carbono em alguns dos tratamentos, elementos essenciais para melhorar a qualidade e fertilidade do solo.

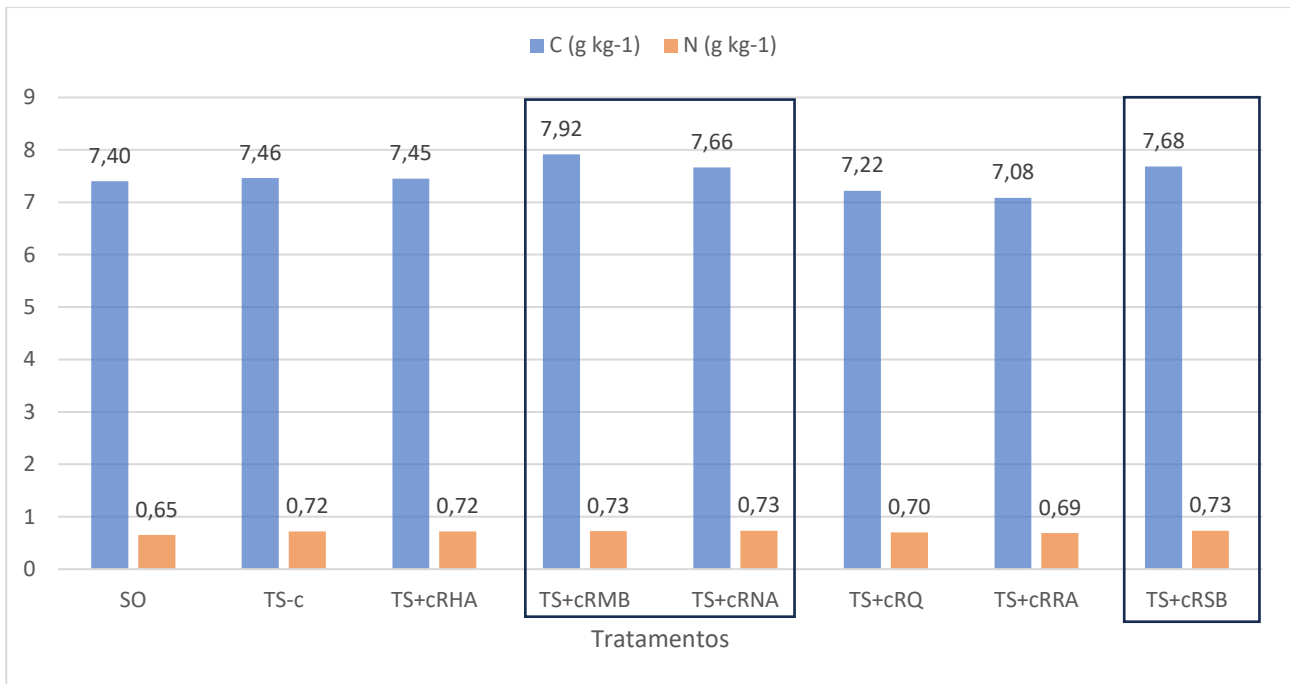


Figura 27. Carbono orgânico e azoto total do solo dos tratamentos com trevos subterrâneos (TS) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS sem inoculação (TS-c). Melhor tratamento (□). Valores médios dos tratamentos com a mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$).

Na análise dos trevos de porte Ereto, conforme apresentado na Figura 28, observamos que os tratamentos com as cepas TE+cRNA e TE+cRSB apresentaram valores superiores tanto para o teor de carbono total quanto para o teor de azoto, em comparação aos demais tratamentos. Este desempenho superior sugere que essas cepas específicas, quando inoculadas com trevos de porte ereto, têm uma contribuição relevante para o enriquecimento do solo com carbono e azoto, nutrientes fundamentais na manutenção da fertilidade ao longo do tempo.

Além disso, é importante notar que essas mesmas cepas (RNA e RSB) já haviam apresentado resultados positivos nos tratamentos com trevos subterrâneos (Figura 27), reforçando seu potencial de atuação em diferentes contextos de plantas de cobertura. Esse padrão consistente indica que as cepas RNA e RSB podem exercer uma influência particularmente robusta na promoção da matéria orgânica do solo e na fixação biológica de azoto (FBA) em diferentes espécies de trevos.

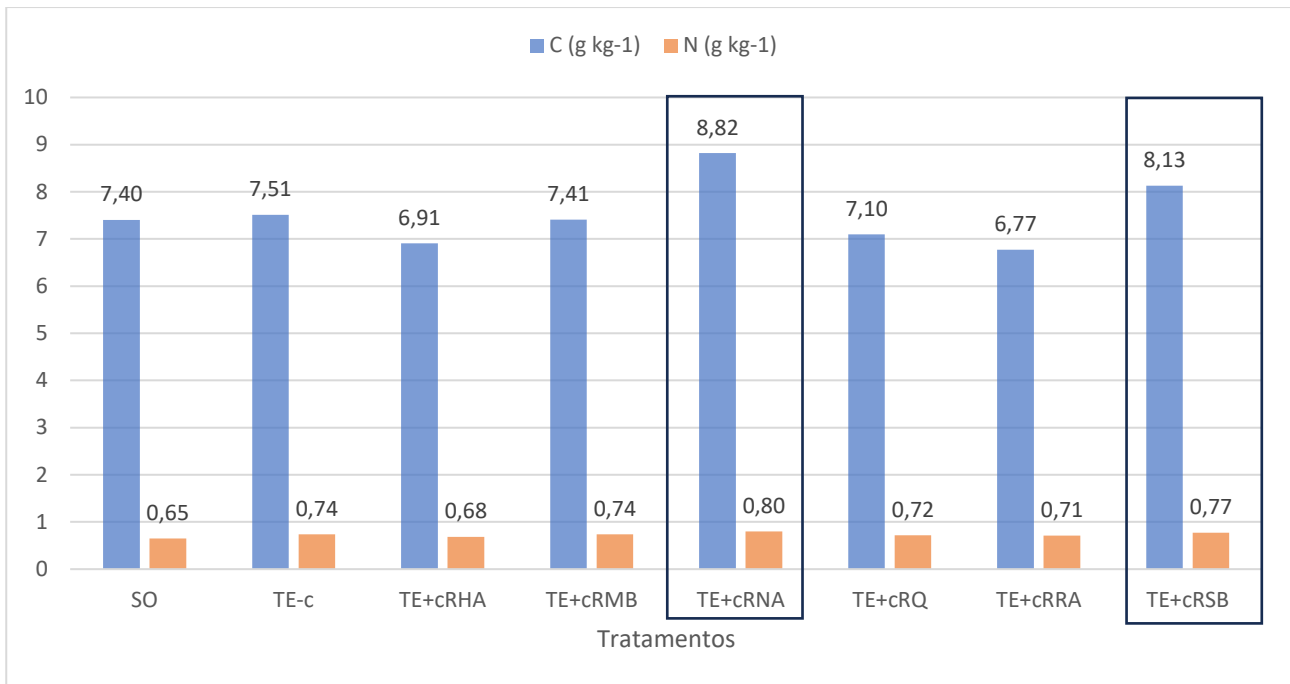


Figura 28. Carbono orgânico e azoto total do solo dos tratamentos com trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TE sem inoculação (TE-c). Melhor tratamento (□).

Na Figura 29 podemos observar os dados de carbono orgânico e azoto total do solo do grupo de tratamentos com mistura de trevos subterrâneos e trevos de porte ereto (TS+TE). Os resultados apresentaram um padrão diferente dos tratamentos anteriores (TS e TE). Em comparação com o solo original (SO), os tratamentos TS+TE+cRHA, TS+TE+cRMB e TS+TE+cRQ destacaram-se com valores mais elevados de carbono e azoto.

Estes resultados indicam que, embora os efeitos das cepas possam variar dependendo das misturas de trevo, a inoculação com rizóbios contribuiu, de um modo geral, para o aumento dos teores de carbono e azoto no solo. Isso reforça a eficiência da inoculação em trevos para a melhoria da fertilidade do solo, promovendo uma melhor qualidade do solo.

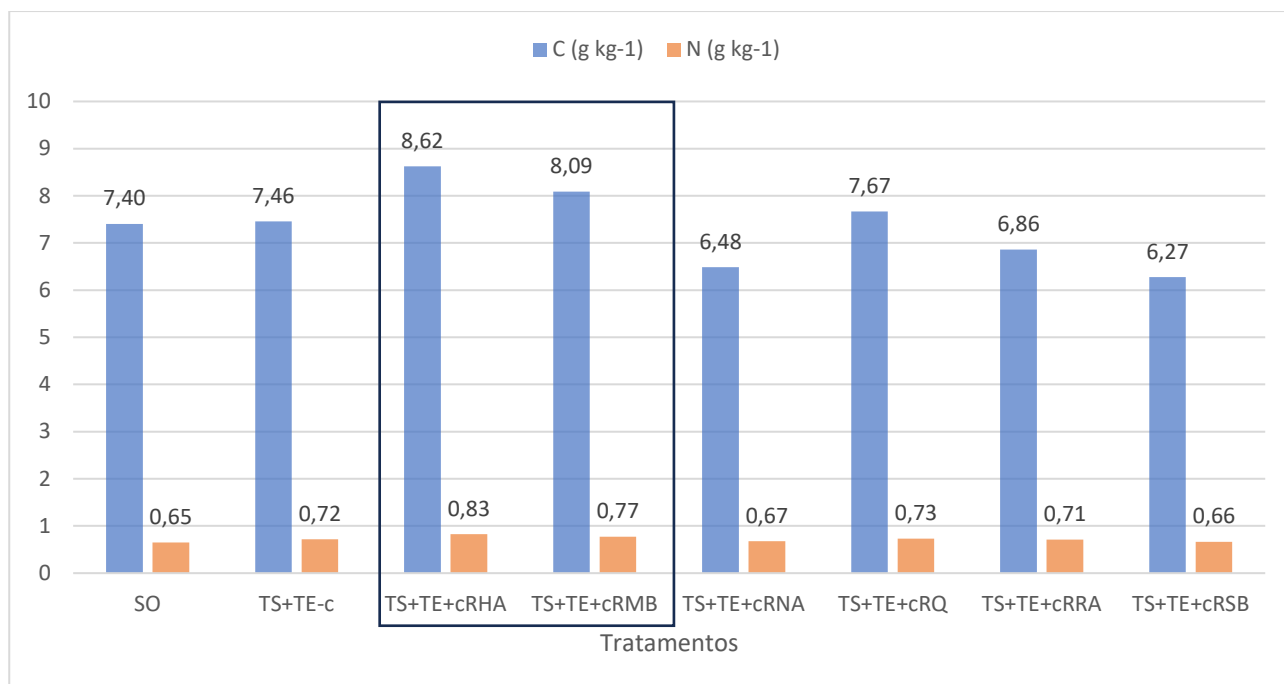


Figura 29. Carbono orgânico e azoto total do solo dos tratamentos com mistura de trevos subterrâneos (TS) e trevos de porte ereto (TE) inoculados com diferentes cepas (c) de rizóbio, solo original (SO) e TS+TE sem inoculação (TS+TE-c). Melhor tratamento (□).

Os resultados obtidos são apoiados por estudos anteriores, como os de Gonçalves e Ceretta (1999), que relataram menores quantidades de carbono em áreas de vegetação espontânea quando comparadas a áreas com plantas de cobertura, como o tremoço azul (*Lupinus angustifolius*). Da mesma forma, Guzmán et al. (2019) observaram que a vegetação espontânea oferece baixa produção de biomassa e efeitos moderados ou desprezíveis nas propriedades do solo, ressaltando que plantas de cobertura com alta produção de biomassa, como os trevos inoculados, são mais eficazes para enriquecer o solo. Adicionalmente, Lima et al. (2005) apontam que plantas de cobertura como o milho, em experimentos de curta duração, promovem o acúmulo de carbono no solo, reforçando o papel dessas plantas na fertilidade e estrutura do solo.

No entanto, a duração limitada deste experimento, que se manteve em andamento por apenas 52 dias, pode explicar as diferenças pouco expressivas nos níveis de carbono orgânico e azoto. Segundo Terçariol (2020), mudanças significativas nesses parâmetros são mais comuns em estudos de longa duração, uma vez que o acúmulo e a estabilização de carbono e azoto requerem tempo para se manifestar.

5.3 Efeitos das cepas de rizóbio e das espécies de trevos nas propriedades físicas e químicas do solo

Globalmente, a inoculação de trevos com cepas de rizóbio (Tabela 3) mostrou efeitos importantes na melhoria de alguns parâmetros de qualidade do solo.

Tabela 3. Efeitos das cepas de *Rhizobium* nas propriedades físicas e químicas do solo. Para cada propriedade do solo, valores seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$) (média \pm DP).

Parâmetro	Controlo	Cepas de <i>Rhizobium</i>					
	Sin	cRHA	cRMB	cRNA	cRQ	cRRA	cRSB
K (cm/h)	1,54 \pm 0,4 ^a	2,32 \pm 0,2 ^{ab}	1,90 \pm 0,2 ^a	1,24 \pm 0,2 ^a	2,82 \pm 0,6 ^b	4,08 \pm 0,4 ^b	2,02 \pm 0,3 ^a
Dap	1,45 \pm 0,0 ^a	1,48 \pm 0,0 ^a	1,47 \pm 0,0 ^a	1,48 \pm 0,0 ^a	1,47 \pm 0,1 ^a	1,41 \pm 0,1 ^b	1,47 \pm 0,1 ^a
CMA (%)	31,9 \pm 0,3 ^a	32,0 \pm 1,0 ^a	32,1 \pm 0,1 ^a	31,2 \pm 1,2 ^a	31,9 \pm 0,6 ^a	34,6 \pm 0,6 ^a	33,9 \pm 1,3 ^a
CC (%)	26,8 \pm 0,4 ^b	17,7 \pm 1,1 ^a	26,8 \pm 0,4 ^b	27,8 \pm 1,3 ^b	28,7 \pm 0,4 ^b	30,6 \pm 0,7 ^b	29,8 \pm 1,2 ^b
P (%)	46,2 \pm 0,3 ^a	47,4 \pm 1,5 ^a	46,9 \pm 0,4 ^a	46,3 \pm 1,2 ^a	46,7 \pm 1,0 ^a	48,3 \pm 1,1 ^a	49,6 \pm 1,0 ^a
MicroP (%)	38,8 \pm 0,4 ^a	38,6 \pm 1,4 ^a	39,2 \pm 0,9 ^a	41,2 \pm 1,4 ^a	42,0 \pm 0,8 ^a	42,9 \pm 1,2 ^a	43,6 \pm 1,1 ^a
MacroP (%)	7,4 \pm 0,8 ^b	8,8 \pm 0,7 ^b	7,8 \pm 0,5 ^b	5,0 \pm 0,1 ^a	4,6 \pm 0,1 ^a	5,5 \pm 0,2 ^a	6,0 \pm 0,3 ^a
Classe 0,25 mm	49,6 \pm 0,5 ^a	44,6 \pm 1,9 ^a	51,9 \pm 3,9 ^a	49,7 \pm 1,1 ^a	52,6 \pm 0,5 ^a	43,7 \pm 2,9 ^a	69,4 \pm 2,1 ^b
Classe 0,40 mm	25,6 \pm 0,9 ^a	25,8 \pm 0,8 ^a	21,6 \pm 2,7 ^a	24,6 \pm 1,0 ^a	24,4 \pm 0,9 ^a	29,4 \pm 1,4 ^a	54,7 \pm 1,5 ^b
C (g kg⁻¹)	7,48 \pm 0,3 ^a	7,66 \pm 0,8 ^a	7,80 \pm 0,6 ^a	7,66 \pm 0,1 ^a	7,33 \pm 0,4 ^a	6,91 \pm 0,2 ^a	7,36 \pm 0,5 ^a
N (g kg⁻¹)	0,72 \pm 0,0 ^a	0,74 \pm 0,1 ^a	0,75 \pm 0,0 ^a	0,74 \pm 0,1 ^a	0,72 \pm 0,0 ^a	0,70 \pm 0,0 ^a	0,72 \pm 0,0 ^a

K - Permeabilidade do solo; Dap - densidade aparente do solo; CMA - capacidade máxima para a água; CC - capacidade de campo; P - Porosidade total do solo; MicroP - microporosidade; MacroP - macroporosidade; Classe 0,25 mm - microagregados do solo; Classe 0,4 mm - macroagregados do solo; Sin - tratamento sem inoculação.

Os resultados evidenciam contribuições específicas de cada cepa nos parâmetros de qualidade do solo. Dentre as cepas estudadas, as cepas RQ e RRA se destacaram ao apresentarem permeabilidade do solo significativamente superior à do solo sem inoculação (Sin), mantendo o solo dentro da faixa de permeabilidade ideal (2,00 a 6,35 cm/h), conforme estabelecido por Oliveira & Melo (1970). Essa característica é crucial para a saúde do solo e o desenvolvimento das plantas, pois favorece a circulação de ar e água, promovendo condições adequadas para o crescimento radicular. Estudos de Chenu & Cosentino (2011), complementados por Rillig et al. (2015), corroboram essa função, destacando que os rizóbios produzem substâncias adesivas, como polissacarídeos extracelulares, que ajudam na formação de agregados e na coesão das partículas do solo, criando uma estrutura mais estável e resiliente. Além da permeabilidade, a densidade aparente, porosidade total,

microporosidade, capacidade máxima para a água e capacidade de campo, também foram favorecidas pela cepa RRA. Esse equilíbrio é importante para evitar compactação excessiva e melhorar tanto a aeração quanto a retenção de água no solo, condições que favorecem o crescimento saudável das plantas (Haynes & Naidu, 1998).

A cepa RSB destacou-se em relação à porosidade total, microporosidade, estabilidade dos agregados e retenção de água no solo, propriedades fundamentais para o armazenamento e movimento de água, bem como para a retenção hídrica em períodos de seca. Já a cepa RHA mostrou superioridade na macroporosidade, garantindo drenagem e oxigenação adequadas. Esses efeitos são especialmente benéficos para evitar encharcamento e promover um ambiente bem oxigenado para as raízes e a atividade microbiana (Six et al., 2000). Por sua vez, as cepas RHA, RNA e RMB, registaram importantes aumentos dos teores de carbono e azoto, nutrientes essenciais para a atividade microbiana e a fertilidade do solo a longo prazo, sustentando a formação de matéria orgânica e uma base nutricional sólida para as plantas e biota do solo (Giller & Cadisch, 1995).

Como referido, os parâmetros capacidade de campo (CC) e capacidade máxima para a água (CMA) mostraram melhorias com a inoculação das cepas RRA e RSB; a CMA aumentou em 2,7% e 2% e a CC em 3,8% e 3%, respectivamente para as cepas RRA e RSB, comparativamente ao tratamento sem inoculação (Sin). Esses dados ressaltam não apenas as vantagens da inoculação com rizóbios, mas também a elevada importância destes pequenos aumentos na capacidade de armazenamento de água no solo em ambientes onde a falta de água, durante o período estival, constitui o principal fator limitante à produção vegetal. Também, em relação ao tratamento sem inoculação (Sin), a cepa RSB contribuiu significativamente para a estabilidade de microagregados (classe 0,25 mm) e macroagregados (classe 0,4 mm) do solo, com aumentos de 19,8% e 29,1%, respectivamente. Estes atributos do solo são importantes para resistência à erosão e para a infiltração de água e retenção de nutrientes. Esse efeito, ao aumentar a resistência do solo à degradação, favorece a sua saúde e resiliência a longo prazo (Drinkwater & Snapp, 2007).

Com base nas análises efetuadas, podemos salientar que as cepas RRA e RSB foram as que apresentaram efeitos mais equilibrados nas propriedades do solo.

A análise filogenética das cepas de rizóbio utilizadas, segundo Saburo (2024), revelou que suas espécies relacionadas influenciam diretamente os seus efeitos benéficos. A cepa RHA foi identificada como pertencente à espécie *Rhizobium viscosum*, enquanto a cepa RNA foi classificada como *Rhizobium beringeri*, ambas associadas a melhorias nas propriedades químicas do solo (C e N). As cepas RQ e RRA, por outro lado, compartilham relações filogenéticas com múltiplas espécies, como *Rhizobium sophorae*, *Rhizobium sp.*, *Rhizobium anhuiense*, *Rhizobium indicum*, *Rhizobium ruizarguesonis*, *Rhizobium phaseoli*, *Rhizobium indigoferae*, *Rhizobium laguerreae*, *Rhizobium pisi*, e *Rhizobium leguminosarum*. Essas espécies são reconhecidas por sua capacidade elevada de fixação de azoto e pela formação de associações simbióticas com leguminosas, sugerindo um potencial de fertilização natural e aumento de azoto disponível para culturas subsequentes. No presente estudo, a cepa RRA teve um bom desempenho na maioria das propriedades físicas do solo. Além disso, as cepas RSB e RMB são filogeneticamente próximas de *Agrobacterium radiobacter* e *Agrobacterium tumefaciens*, evidenciando sua eficácia para a estrutura e fertilidade do solo, respetivamente.

Embora o presente estudo não tenha identificado diferenças estatisticamente significativas nos níveis de azoto entre os tratamentos, a literatura documenta o potencial de algumas cepas de *Agrobacterium* para fixar N₂ (Ladha & Reddy, 2000). Estudos de Kanvide et al. (1987) e Kanvide & Sastry (1990) demonstraram que cepas de *Agrobacterium tumefaciens* (como as cepas C58 e B6) foram capazes de fixar N₂ em meio de cultivo sem azoto combinado, sugerindo que certas cepas podem contribuir para o aporte de azoto ao solo, mesmo que de forma menos intensa do que as cepas de *Rhizobium*.

Adicionalmente, os resultados deste estudo encontram apoio no estudo realizado em Suções, Mirandela por Rodrigues et al. (2012), onde foi observado que a mineralização da biomassa de leguminosas, como o tremoço branco, resultou em um aumento significativo na disponibilidade de azoto no solo, equivalente a 73 kg N ha⁻¹, beneficiando as culturas subsequentes. De forma semelhante, os dados da Tabela 2 sugerem que algumas cepas de *Rhizobium* têm o potencial de promover a fixação de azoto, contribuindo para o aporte nutricional em solos cultivados. Estes resultados ressaltam a importância de sincronizar a liberação de azoto resultante da mineralização com as fases de maior demanda nutricional das plantas, a fim de maximizar a eficiência do uso de azoto pelas culturas e reduzir perdas

por processos como lixiviação e desnitrificação, que são frequentemente exacerbados em períodos de baixa absorção pelas plantas (Myers et al., 1994).

Num estudo conduzido em Trás-os-Montes (Viegas et al., 2017), a inoculação em leguminosas demonstrou benefícios significativos, especialmente em culturas de *Trifolium* (trevos subterrâneos e de porte ereto). A Tabela 2 evidencia que a inoculação de trevos com rizóbios também promoveu um aumento no teor de azoto no solo, destacando-se como um fator importante para a produtividade em culturas que têm grande exigência desse nutriente. Em particular, a fixação simbiótica do azoto proporcionada pela inoculação mostrou-se crucial para o desenvolvimento robusto e a melhoria da saúde do solo, pois é um elemento que frequentemente está em deficiência no solo.

O presente ensaio com trevos inoculados com rizóbios em solos de olivais de Trás-os-Montes reforça o papel da inoculação para otimizar o cultivo de leguminosas em sistemas agrícolas. A inoculação permite que essas plantas fixem azoto atmosférico de forma mais eficaz, o que não apenas reduz a necessidade de fertilizantes sintéticos, mas também contribui para um manejo sustentável do solo e para a recuperação de nutrientes. Em tais contextos, o uso de leguminosas inoculadas com rizóbios específicos surge como uma estratégia de alto impacto, melhorando a saúde e a produtividade do solo e fortalecendo a viabilidade de culturas como o trevo.

Além disso, as melhorias proporcionadas pela inoculação em plantas do género *Trifolium* são indicativas de uma estratégia de rotação que favorece a sustentabilidade e a economia de insumos. A inclusão de leguminosas inoculadas não só aumenta a disponibilidade de azoto para as culturas subsequentes, mas também responde à demanda de agricultores interessados em produzir soja e outras leguminosas para alimentação animal, alinhando-se com as práticas de agricultura sustentável. Assim, a inoculação de trevos com rizóbios mostra-se essencial para a otimização da produtividade agrícola, promovendo benefícios a longo prazo para o solo, para a redução do uso de fertilizantes químicos e para a sustentabilidade dos agro-sistemas locais.

De acordo com Saburo (2023), a produção de biomassa variou conforme a cepa e o tipo de trevo avaliado. A cepa RRA destacou-se na produção de biomassa para trevos subterrâneos, enquanto RHA e RSB apresentaram melhores resultados para trevos de porte ereto. Na mistura de trevos subterrâneos e de porte ereto, as cepas RNA, RRA e RSB

demonstraram maior eficiência, evidenciando seu potencial para maximizar a produção de biomassa.

Os dados apresentados na Tabela 4 reforçam a eficácia das leguminosas, como as do género *Trifolium*, na melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, destacando-se a importância da inoculação com rizóbios específicos para o aumento da fertilidade do solo (Tabela 3).

Tabela 4. Efeitos de plantas do género *Trifolium* (trevos subterrâneos, TS; trevos porte ereto, TE) com (Cin) e sem (Sin) inoculação em parâmetros físicos e químicos do solo. Para cada propriedade do solo, valores seguidos da mesma letra não diferem significativamente ($p > 0,05$) (média \pm DP).

Parâmetro	Tratamentos					
	TSSin	TSCin	TESin	TECin	TS+TESin	TS+TECin
K (cm/h)	1,30 \pm 0,1 ^a	2,31 \pm 0,4 ^b	1,25 \pm 0,5 ^a	2,19 \pm 0,5 ^b	2,07 \pm 0,9 ^{ab}	2,70 \pm 0,3 ^b
Dap	1,46 \pm 0,0 ^a	1,47 \pm 0,0 ^a	1,43 \pm 0,0 ^a	1,48 \pm 0,0 ^a	1,47 \pm 0,0 ^a	1,44 \pm 0,0 ^a
CMA (%)	30,0 \pm 1,3 ^a	32,34 \pm 1,1 ^a	32,4 \pm 1,8 ^a	32,5 \pm 1,1 ^a	33,3 \pm 1,3 ^a	32,9 \pm 0,5 ^a
CC (%)	25,0 \pm 1,3 ^a	28,2 \pm 1,2 ^a	27,4 \pm 1,1 ^a	27,8 \pm 1,0 ^a	27,9 \pm 1,8 ^a	24,7 \pm 0,9 ^a
P (%)	43,8 \pm 2,1 ^a	47,6 \pm 0,7 ^a	46,1 \pm 1,9 ^a	47,9 \pm 1,4 ^a	48,8 \pm 1,6 ^a	47,2 \pm 0,5 ^a
MicroP (%)	36,5 \pm 2,1 ^a	41,5 \pm 1,0 ^a	39,2 \pm 1,4 ^a	41,1 \pm 1,2 ^a	40,8 \pm 2,0 ^a	41,3 \pm 0,7 ^a
MacroP (%)	7,3 \pm 0,4 ^a	6,1 \pm 0,7 ^a	7,0 \pm 2,1 ^a	6,8 \pm 0,4 ^a	7,9 \pm 1,2 ^a	5,9 \pm 0,2 ^a
Classe 0,25 mm	47,8 \pm 0,9 ^a	52,9 \pm 1,7 ^a	49,5 \pm 1,5 ^a	53,1 \pm 2,4 ^a	51,5 \pm 1,8 ^a	50,1 \pm 2,2 ^a
Classe 0,40 mm	23,7 \pm 2,3 ^a	25,2 \pm 1,1 ^a	27,1 \pm 1,7 ^a	36,0 \pm 1,7 ^b	26,0 \pm 3,4 ^a	29,1 \pm 1,4 ^a
C (g kg ⁻¹)	7,46 \pm 1,2 ^a	7,42 \pm 0,5 ^a	7,51 \pm 1,1 ^a	7,52 \pm 0,3 ^a	7,46 \pm 0,7 ^a	7,33 \pm 0,6 ^a
N (g kg ⁻¹)	0,72 \pm 0,1 ^a	0,71 \pm 0,0 ^a	0,74 \pm 0,1 ^a	0,74 \pm 0,0 ^a	0,72 \pm 0,1 ^a	0,73 \pm 0,1 ^a

K - Permeabilidade do solo; Dap - densidade aparente do solo; CMA - capacidade máxima para a água; CC - capacidade de campo; P - Porosidade total do solo; MicroP - microporosidade; MacroP - macroporosidade; Classe 0,25 mm - microagregados do solo; Classe 0,4 mm - macroagregados do solo; Sin - tratamentos sem inoculação.

A análise dos efeitos das variedades de trevos sobre a permeabilidade do solo mostrou que o tratamento com a combinação de TS+TECin apresentou os melhores resultados, com valores na faixa média de 2,00 a 6,35 cm/h, estando de acordo com os parâmetros estabelecidos por Oliveira & Melo (1970). Esse achado sugere que a mistura pode proporcionar vantagens para a estrutura do solo, embora estudos adicionais sejam necessários para confirmar essa tendência de maneira robusta.

Ao examinar os parâmetros avaliados, observa-se uma leve tendência de melhoria nos tratamentos que receberam inoculação, ainda que essa diferença não tenha se mostrado estatisticamente significativa. Esse efeito sutilmente positivo é perceptível em diversos aspetos específicos, incluindo a Dap em TS+TECin, a CC em TSCin, a MicroP em todos os tratamentos com inoculação (TSCin, TECin e TS+TECin), a estabilidade dos agregados e teores de C e N em TECin.

Embora esses ganhos não sejam estatisticamente comprovados, a inoculação parece estar associada a pequenas melhorias que podem influenciar positivamente determinadas características físico-químicas dos solos. Esses resultados, mesmo que preliminares, indicam um potencial benefício e ressaltam a importância de investigações adicionais.

6. CONCLUSÃO

Conclui-se que, globalmente, a inoculação de *Trifolium* spp. com diferentes cepas de rizóbios representa uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade física e química do solo, promovendo benefícios para a sustentabilidade dos solos agrícolas. Os resultados obtidos demonstram que as cepas específicas de rizóbios, como a RRA e a RSB, desempenham papéis fundamentais na otimização da fertilidade e na estrutura do solo, aumentando a disponibilidade de azoto e promovendo a estabilidade dos agregados, a porosidade e a retenção de água. Esses efeitos são cruciais para a saúde do solo e para a sustentabilidade das culturas, visto que um solo bem estruturado e com boa disponibilidade de nutrientes favorece o crescimento das plantas, reduz a necessidade de fertilizantes químicos e auxilia na preservação da estrutura do solo contra a erosão.

As análises realizadas ao longo do estudo evidenciam que os tratamentos com trevos de porte ereto inoculados, assim como as misturas de trevos subterrâneos com trevos de porte ereto também inoculados, apresentaram os melhores resultados em comparação aos demais tratamentos. Esses achados destacam a superioridade dessas combinações, reforçando seu potencial para aplicações futuras.

Além de seu impacto positivo na produtividade agrícola, a inoculação com rizóbios contribui para práticas de manejo mais sustentáveis, ao fortalecer o ciclo de nutrientes e reduzir o impacto ambiental dos insumos sintéticos. Essa pesquisa confirma a importância das leguminosas, associadas a rizóbios, no manejo do solo, destacando seu potencial como adubo verde e cobertura vegetal em sistemas agrícolas. Recomenda-se a ampliação de estudos a longo prazo e em diversas condições ambientais para explorar plenamente as aplicações agronômicas dos rizóbios, consolidando seu papel na construção de sistemas agrícolas resilientes e ambientalmente responsáveis.

BIBLIOGRAFIA

- AGUIAR, C. & RODRIGUES, F. M. (2010). Trevo-balansa (*Trifolium michelianum* Savi). *Fichas Técnicas* 1, 5-6.
- ALVES, C., CAMPOS, T. de S. & da SILVA, D. V. (2024). Práticas edáficas, vegetativas e mecânicas para controle de erosão. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, 2(1).
- ANDERS, M. M., BECK, P. A., WATKINS, B. K., GUNTER, S. A., LUSBY, K. S. & HUBBELL, D. S. (2010). Soil aggregates and their associated carbon and nitrogen content in winter annual pastures. *Soil Water Management and Conservation* 74, 1339-1347.
- ANDREOLA, F. (2001). Efeito do consórcio de espécies de inverno para cobertura do solo sobre o rendimento de milho e de feijão. In: Livro de Resumos da Reunião técnica catarinense de milho e feijão. p. 313-317. Chapecó: EPAGRI-CPPP.
- ANDREOLA, F. & FERNANDES, S. A. P. (2007). A microbiota do solo na agricultura orgânica e no manejo das culturas. *Microbiota do solo e qualidade ambiental. Campinas: Instituto Agronômico*. p. 21-37.
- ARRUDA, M. R. & da COSTA, J. R. (2003). Importância e alguns aspectos no uso de leguminosas na Amazônia.
- ARAÚJO, E. A., KER, J. C., NEVES, J. C. L. & LANI, J. L. (2012). Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Applied Research & Agrotechnology* 5(1), 187-206.
- BALL, K. R., BALDOCK, J. A., PENFOLD, C., POWER, S. A., WOODIN, S. J., SMITH, P. & PENDALL, E. (2020). Soil organic carbon and nitrogen pools are increased by mixed grass and legume cover crops in vineyard agroecosystems: Detecting short-term management effects using infrared spectroscopy. *Geoderma* 379, 114619.
- BALDISSERA, I. T. & SCHERER, E. H. (1991). Efeito da Mucuna e da Adubação Nitrogenada na Cultura do Milho em Latossolo Roxo Distrófico (LRd). In *Reunião Sul-*

Brasileira de Adubação Verde e Rotação de Culturas. Vol. 3, pp. 129. OCEPAR, Cascavel, PR.

BENATTI JÚNIOR, R. B. (1983). Manejo convencional e reduzido em quatro tipos de solos na cultura do milho em São Paulo. *Fundação Cargill*.

BENTLEY, O. G. (1985). Soil erosion and crop productivity: a call for action. In *Soil Erosion and Crop Productivity*. p. 1-7.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (2005). *Conservação do Solo*. São Paulo: Ícone Editora.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (1990). *Conservação do Solo*. São Paulo: Ícone.

BOARDMAN, J. (1990). Soil erosion on the South Downs: a review. *Journal of Soil Conservation* 87-105.

BOMFETI, C. A., FLORENTINO, L. A., GUIMARÃES, A. P., CARDOSO, P. G., GUERREIRO, M. C. & MOREIRA, F. M. D. S. (2011). Exopolissacarídeos produzidos por bactérias fixadoras de nitrogênio simbióticas de leguminosas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35, 657-671.

CALEGARI, A. (1991). Efeito dos resíduos de mucuna preta (*Stizolobium aterrimum* L.) no rendimento do milho. In *Reunião Sul-Brasileira de Adubação Verde e Rotação de Culturas*. Vol. 3, pp. 127. Cascavel, PR: OCEPAR.

CARVALHO, C. A., FERREIRA, R. L. F., ANDRADE, R. A., DE BRITO, R. S., PEREIRA, T. C. R. & LIMA, T. J. L. (2020). Atributos físicos em solos cultivados com plantas de cobertura. *Scientia Naturalis*, 2(1).

CAPUTO, H. P. (1988). *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações*. Rio de Janeiro: Ltc-livros Técnicos e Científicos.

CHERUBIN, M. R., VANOLLI, B. D. S., SOUZA, L. F. N., CANISARES, L. P., PINHEIRO JUNIOR, C. R., SCHIEBELBEIN, B. E. & MAROSTICA, M. E. M. (2024). *Guia prático de plantas de cobertura: espécies, manejo e impacto na saúde do solo*.

- CHENU, C. & COSENTINO, D. (2011). Microbial regulation of soil structural dynamics. In Huang, P. M., Li, Y. & Sumner, M. E. (Eds.), *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes*. p. 149-173.
- COM (2006). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC (presented by the Commission). Commission of the European Communities, 232 final. Brussels, 22.9.2006.
- CORBY, H. D. L. (1981). The systematic value of leguminous root nodules. *Journal of Systematic Botany* 657-676.
- COSTA JUNIOR, C., PÍCCOLO, M. D. C., SIQUEIRA NETO, M., CAMARGO, P. B. D., CERRI, C. C. & BERNOUX, M. (2012). Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36, 1311-1322.
- DAO, T. H. (1996). Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a Paleustoll. *Agronomy Journal* 88(2), 141-148.
- DAROLT, M. R. (1998). Considerações gerais e perspectivas de expansão. In “Plantio Direto. Pequena propriedade sustentável”. p. 1-15. Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) Circular 101, Londrina, PR, Brasil.
- DE GRYZE, S., BOSSUYT, H., SIX, J., van MEIRVENNE, M., GOVERS, G. & MERCKX, R. (2008). Factors controlling aggregation in a minimum and a conventionally tilled undulating field. *European Journal of Soil Science* 58, 1017-1026.
- DRINKWATER, L. E. & SNAPP, S. (2007). Nutrients in agroecosystems: rethinking the management paradigm. *Advances in Agronomy* 92, 163-186.
- ESPINDOLA, J. A., GUERRA, J. G. M., DE-POLLI, H., DE ALMEIDA, D. L. & ABBOUD, A. D. S. (2005). *Adubação verde com leguminosas*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Seropédica: Embrapa Agrobiologia.
- FAO (2015). *Solos - À conquista do crachá*. Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo.

- FAO/ITPS (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations & Intergovernmental Technical Panel on Soils.
- FAO (2022). *Soil biodiversity and agriculture: the unseen world beneath our feet*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FIGUEIREDO, T. (2013). Determinação laboratorial da condutividade hidráulica do solo e Realização de exercícios sobre exploração de aquíferos. *Mestrado em Tecnologia Ambiental*. Escola Superior Agrária de Bragança.
- FRASCA, L. L. DE M., SILVA, M. A., REZENDE, C. C., FARIA, D. R., LANNA, A. C., FERREIRA, E. P. DE B., LACERDA, M. C. & NASCENTE, A. S. (2021). Utilização de plantas de cobertura como alternativa de manejo sustentável. *recima21 - Revista Científica Multidisciplinar* 2(7), 1-14.
- GILLER, K. E. & CADISCH, G. (1995). Future benefits from biological nitrogen fixation: an ecological approach to agriculture. In *Management of Biological Nitrogen Fixation for the Development of More Productive and Sustainable Agricultural Systems: Extended versions of papers presented at the Symposium on Biological Nitrogen Fixation for Sustainable Agriculture at the 15th Congress of Soil Science, Acapulco, Mexico, 1994* (pp. 255-277). Springer Netherlands.
- GONÇALVES C.N., CERETTA C. A. (1999) Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23(2), 307-313.
- GREEN, V. S., CAVIGELLI, M. A., DAO, T. H. & FLANAGAN, D. C. (2005). Soil physical properties and aggregate-associated C, N and P distributions in organic and conventional cropping systems. *Soil Science Journal* 170, 822-831.
- GURMU, G. (2019). Soil organic matter and its role in soil health and crop productivity improvement. *Forest Ecology and Management* 7(7), 475-483.
- GUERRA, A. J. T. (1991). Soil Characteristics and Erosion with Particular Reference to Organic Matter Content. [Diss.].

- GUSMÃO FILHO, J. de A. (2002). *Solos: Da Formação Geológica ao Uso na Engenharia*. Editora Universitária UFPE.
- GUZMÁN G., CABEZAS J. M., SÁNCHEZ-CUESTA R., LORA Á., BAUER T., STRAUSS P., WINTER S., ZALLER J. G. & GÓMEZ J. A. (2019). A field evaluation of the impact of temporary cover crops on soil properties and vegetation communities in southern Spain vineyards. *Agriculture, ecosystems & environment* 272, 135-145.
- HALL, D. J. M., MEKENZIE, D. C. & MACLEOD, D. A. (1994). Amelioration of a Hardsetting Alfisol through deep mouldboard ploughing, gypsum application and double cropping. I. Soil physical and chemical properties. *Soil & Tillage Research* 28, 253-270.
- HAYNES, R. J. & NAIDU, R. (1998). Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 123-137.
- HUNGRIA, M., CAMPO, R. J. & MENDES, I. C. (2007). A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro.
- INGELS, C. A., BUGG, R. L., MCGOURTY, G. T. & CHRISTENSEN, L. P. (1998). *Cover Cropping in Vineyards: A Grower's Handbook*. University of California. Publication 3338. Oakland.
- IPMA (2022). *Fichas Climatológicas - Bragança 1971-2000*. Lisboa, 2022. Disponível em: <https://www.ipma.pt>. Acesso em: 3 dez. 2024.
- IPMA (2023). Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Ficha Climatológica (1971-2000) – Mirandela.
- KANVIDE, L., SASTRY, & G. R. K. (1990). *Agrobacterium tumefaciens* is a diazotrophic bacterium. *Applied and Environmental Microbiology* 56, 2087-2092.
- KANVIDE, L., SOLIMAN, M. H., WARDHAN, H., NOWELL, L., FOX, D. & SASTRY, G. R. K. (1987). Studies on the diazotrophic nature of *Agrobacterium*. *Current Plant Science Biotechnology Agriculture* 3, 309-312.

- KAYOMBO, B. & LAL, R. (1993). Tillage systems and soil compaction in africa. *Soil & Tillage Research* 27, 35-72.
- LADHA, J. K. & REDDY, P. M. (2003). Nitrogen fixation in rice systems: state of knowledge and future prospects. *Plant and Soil* 252, 151-167.
- LEPSCH, I. F. (2010). Formação e conservação dos solos. In *São Paulo: Oficina de Texto* (2. ed.). Oficina de Textos.
- LIMA, V. C., LIMA, M. R. & MELO, V. de F. (2007). *O solo no meio ambiente*. 1a ed. Vol. 1. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola.
- LIMA E., CRUSCIOL C. A. C., LEITÃO-LIMA P., & CORRÊA J. (2005) Espécies para cobertura e qualidade dos resíduos vegetais na implantação do sistema de plantio direto em região de inverno seco. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo* 4(2), 180-194.
- LOCATELLI, J. L. (2018). Plantas de cobertura em sucessão ao milho e sua contribuição no carbono orgânico do solo.
- LUPIÁN-MACHUCA, M. D. R., CRUZ-CÁRDENAS, G., FLORES-MAGALLON, R., OCHOA-ESTRADA, S., SILVA, J. T. & MARTÍNEZ-TRINIDAD, S. (2024). Infiltration Capacity of Three Types of Soil in the Sahuayo River Basin. Available at SSRN 4681569.
- MENESES, B. M. (2011). Erosão hídrica do solo: caso de estudo do concelho de Tarouca. [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- MENESES, B. M. (2013). Análise das alterações do uso e ocupação do solo no Vale do Varosa (Portugal) mediante imagens Landsat-TM e sua influência na conservação do solo. *GeoFocus* 13(1), 270-290.
- MOREIRA, F. M. M. & SIQUEIRA, J. O. (2006). *Microbiologia e Bioquímica do Solo* (2. ed.). Lavras: Editora UFLA. p. 449-542.
- MORGAN, R. P. C. (1986). *Soil Erosion and Conservation*. Essex: Longman Group Limited.

- MONTANARELLA, L., BADRAOUI, M., CHUDE, V., BAPTISTA COSTA, I. D. S., MAMO, T., YEMEFACK, M., & MCKENZIE, N. (2015). Intergovernmental Technical Panel on Soils: Status of the World's Soil Resources.
- MYERS, R. J. K., PALM, C. A., CUEVAS, E., GUNATILLEKE, I. U. N. & BROSSARD, M. (1994). The synchronisation of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. In *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. p. 81-116.
- OLIVEIRA, L. B. & MELO, V. (1970). Caracterização físico-hídrica do solo. I. Unidade Itapirema. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 5(1), 35-48.
- ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R., REPULLO-RUIBÉRRIZ DE TORRES, M. A., MÁRQUEZ-GARCÍA, J., MORENO-GARCÍA, M. & CARBONELL-BOJOLLO, R. M. (2018). Legumes used as cover crops to reduce fertilisation problems improving soil nitrate in an organic orchard. *European Journal of Agronomy* 95, 1-13.
- PARADA, A. (1984) Efeito de fósforo e de micorriza vesículo-arbuscular no feijoeiro. [Diss. Universidade de São Paulo].
- PEREIRA, M. G., NETO, A. R., ANJOS, L. H. C. & CEDDIA, M. B. (2020). *Práticas de Morfologia e Física do Solo* (1st ed.). Editora da UFRRJ.
- RAMOS, T. B., GONÇALVES, M. DA C. & MARTINS, J. C. (2016). Características de retenção de água no solo para utilização na rega das culturas. Oeiras: Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária.
- REDIN, M., GIACOMINI, S. J., FERREIRA, P. A. A. & ECKHARDT, D. P. (2016). Plantas de cobertura de solo e agricultura sustentável: espécies, matéria seca e ciclagem de carbono e nitrogênio. In *Manejo e Conservação do Solo e da Água em Pequenas Propriedades Rurais no Sul do Brasil: Práticas Alternativas de Manejo Visando a Conservação do Solo e da Água*. Vol. 1, p. 7-22. UFRGS.
- RILLIG, M. C., AGUILAR-TRIGUEROS, C. A., BERGMANN, J., VERBRUGGEN, E., VERESOGLOU, S. D. & LEHMANN, A. (2015). Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation. *New Phytologist* 205(4), 1385-1388.

- RUSDI, M., ROOSLI, R. & AHAMAD, M. S. S. (2015). Avaliação da adequação da terra para assentamento com base na permeabilidade do solo, topografia e geologia dez anos após o tsunami em Banda Aceh, Indonésia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 18(2), 207-215.
- RYDBERG, T. (1990). Effects of ploughless tillage and straw incorporation on evaporation. *Soil & Tillage Research* 17, 303-314.
- SABURO, R. S. S. (2024). *Fixação biológica de azoto por bactérias diazotróficas em plantas do género Trifolium*. Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Bragança.
- SADOWSKY, M. (2005). Soil stress factors influencing symbiotic nitrogen fixation. In WERNER, D. & NEWTON, W. (Eds.), *Nitrogen Fixation in Agriculture, Forestry, Ecology, and the Environment*. Vol. 4, p. 89-112. Dordrecht: Springer.
- SALTON, J. C., MIELNICZUK, J., BAYER, C., BOENI, M., CESAR CONCEIÇÃO, P., CARVALHO FABRÍCIO, A., CLÁUDIO MOTTA MACEDO, M. & LUIZ BROCH, D. (2008). Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 11-21.
- SANTANA, A. L. da S. & ARAUJO, G. L. (2018). Erosão do solo em uma propriedade rural no município de Abre Campo (MG). *Anais do Seminário Científico da FACIG*, 3.
- SANTOS, D. R., COSTA, M. D. C. S., DE MIRANDA, J. R. P. & SANTOS, R. V. (2008). Micorriza E Rizóbio No Crescimento E Nutrição Em Nep De Mudas De Angico-Vermelho. *Revista Caatinga* 21(1), 76-82.
- SANTOS, R. V. (2019). Efeito de mobilizações com tração animal nas propriedades físicas do solo. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança.
- SILVESTRE, L. M. (2022). Utilização de condicionadores à base de bagaço de azeitona para melhoria da estabilidade da agregação do solo na região de Trás-os-Montes. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança.

- SIX, J., ELLIOTT, E.T. & PAUSTIAN, K. (2000) Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32 2099-2103.
- TERÇARIOL, M. C. (2020). Formas lábeis de carbono e nitrogênio no solo em função de plantas de cobertura e adubação nitrogenada. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista.
- VIEGAS, R., ARROBAS, M., TIPEWA, N. & RODRIGUES, M. A. (2017). Estudos com inoculação e densidades de sementeira em soja no interior norte de Portugal. *XXXVIII Reunião de Primavera da SPPF*, 27-28.
- WEINERT, C., SOUSA, R. O., BORTOWSKI, E. M., CAMPELO, M. L., PACHECO, D. da S., SANTOS, L. V., DEUNER, S., VALENTE, G. B., MATOS, A. B., VARGAS, V. L., MARTINS, A. P., CAMARGO, F. A. de O. & CARLOS, F. S. (2023). Legume winter cover crop (Persian clover) reduces nitrogen requirement and increases grain yield in specialized irrigated hybrid rice system. *European Journal of Agronomy*, 142.
- WÜRSCHÉ, W. & DENARDIN, L. E. (1980). Conservação e manejo dos solos - I. Planalto Rio-grandense. Considerações gerais. *Circular Técnica Nacional de Pesquisa do Trigo* 2, 1-20.