

FACULDADE SANTO ÂNGELO - FASA
BACHARELADO EM AGRONOMIA

ALEX GNATTA

**EFEITOS DAS PLANTAS DE COBERTURA NA REDUÇÃO DA COMPACTAÇÃO
DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS**

SANTO ÂNGELO/RS

2026

ALEX GNATTA

**EFEITOS DAS PLANTAS DE COBERTURA NA REDUÇÃO DA COMPACTAÇÃO
DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Agronomia pela Faculdade Santo Ângelo
- FASA.

Orientador: Prof. Júnior Milanesi

SANTO ÂNGELO/RS

2026

FACULDADE SANTO ÂNGELO
CURSO DE AGRONOMIA

ALEX GNATTA

**EFEITOS DAS PLANTAS DE COBERTURA NA REDUÇÃO DA COMPACTAÇÃO
DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Agronomia pela Faculdade Santo
Ângelo - FASA.

Aprovado em: 09 de JULHO de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Júnior Milanesi

Faculdade Santo Ângelo - FASA

Micael Stolben

Faculdade Santo Ângelo - FASA

Alieze Nascimento

Faculdade Santo Ângelo - FASA

RESUMO

A compactação do solo constitui uma das principais formas de degradação física em sistemas agrícolas, afetando diretamente atributos como porosidade, infiltração de água, aeração, desenvolvimento radicular e produtividade das culturas. Nesse contexto, as plantas de cobertura têm sido apontadas como alternativa conservacionista capaz de melhorar a qualidade estrutural do solo, aumentar a matéria orgânica, estimular a atividade biológica e contribuir para a formação de canais naturais no perfil do solo. O presente trabalho teve como objetivo analisar, por meio de revisão bibliográfica sistematizada, a influência das plantas de cobertura na redução da compactação do solo em sistemas agrícolas, considerando seus efeitos sobre a estrutura física, a porosidade, a infiltração de água e o desenvolvimento radicular. A pesquisa foi desenvolvida a partir da análise de artigos científicos, livros, dissertações, teses e documentos técnicos nacionais, consultados em bases como SciELO, Google Scholar, Portal de Periódicos da CAPES, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações e publicações da Embrapa. Foram priorizados estudos brasileiros relacionados à compactação do solo, plantas de cobertura, bioporos, matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e manejo conservacionista. Os resultados demonstraram que a compactação está associada ao tráfego de máquinas, ao manejo inadequado da umidade, à baixa cobertura vegetal e à redução da matéria orgânica. Também se verificou que espécies como braquiária, milheto, aveia-preta, crotalária, mucuna-preta e nabo-forrageiro apresentam diferentes contribuições para a melhoria da qualidade física do solo, atuando por meio da produção de palhada, formação de raízes, ciclagem de nutrientes, estímulo à atividade biológica e formação de bioporos. Conclui-se que as plantas de cobertura representam uma estratégia promissora para reduzir os efeitos da compactação, desde que inseridas em um sistema de manejo integrado, contínuo e tecnicamente planejado, associado à rotação de culturas, ao plantio direto e à manutenção da matéria orgânica do solo.

Palavras-chave: compactação do solo; plantas de cobertura; bioporos; matéria orgânica; manejo conservacionista.

Abstract

Soil compaction is one of the main forms of physical soil degradation in agricultural systems, directly affecting soil properties such as porosity, water infiltration, aeration, root development, and crop productivity. In this context, cover crops have been recognized as a sustainable alternative capable of improving soil structure, increasing organic matter content, stimulating biological activity, and promoting the formation of natural biopores within the soil profile. This study aimed to analyze, through a systematic literature review, the influence of cover crops on reducing soil compaction in agricultural systems, considering their effects on soil physical structure, porosity, water infiltration, and root development. The research was based on the analysis of scientific articles, books, dissertations, theses, and technical publications retrieved from databases such as SciELO, Google Scholar, the CAPES Periodicals Portal, the Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations, and EMBRAPA publications. Priority was given to Brazilian studies addressing soil compaction, cover crops, biopores, organic matter, nutrient cycling, and conservation management. The results showed that soil compaction is mainly associated with machinery traffic, inadequate soil moisture management, insufficient soil cover, and reduced organic matter content. The review also indicated that species such as *Brachiaria* spp., pearl millet, black oat, sunn hemp, velvet bean, and forage radish contribute differently to improving soil physical quality through biomass production, root development, nutrient cycling, stimulation of biological activity, and biopore formation. It is concluded that cover crops represent an effective strategy for mitigating soil compaction, provided they are integrated into a continuous and well-planned conservation management system associated with crop rotation, no-tillage farming, and the maintenance of soil organic matter.

Keywords: soil compaction; cover crops; biopores; organic matter; conservation management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Erosão em solos de agricultura inadequada.....	16
Figura 2 - Redução de erosão do solo em diferentes práticas conservacionista (%).	20
Figura 3 - Benefícios fornecidos pela utilização de plantas de cobertura	24
Figura 4 - Incremento médio de matéria orgânica no solo.....	30
Figura 5 - Principais plantas de cobertura de solo	31
Figura 6 - Comparativo da produtividade agrícola conforme o manejo do solo	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais formas de degradação física do solo e seus efeitos na agricultura	11
Tabela 2 - Estratégias conservacionistas e seus efeitos sobre a qualidade do solo.	19
Tabela 3 - Benefícios físicos, químicos e biológicos das plantas de cobertura para a qualidade do solo	28
Tabela 4 - Comparação entre espécies de plantas de cobertura e sua contribuição para a conservação do solo	32
Tabela 5 - Diretrizes para a escolha de plantas de cobertura conforme o tipo de solo	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL	10
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1 DEGRADAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS	11
2.1.1 Degradação do solo e produção de alimentos.....	12
2.1.2 Principais formas de degradação física do solo	14
2.2 IMPACTOS DA DEGRADAÇÃO FÍSICA DO SOLO NA AGRICULTURA	15
2.3 ESTRATÉGIAS CONSERVACIONISTAS PARA A REDUÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO SOLO	18
2.4 O SURGIMENTO DAS PLANTAS DE COBERTURA COMO ALTERNATIVA PARA A CONSERVAÇÃO DO SOLO	21
2.4.1 O papel das plantas de cobertura na melhoria da qualidade do solo	23
2.5 PESQUISAS SOBRE PLANTAS DE COBERTURA	27
2.5.1 Benefícios das plantas de cobertura para a estrutura do solo.....	28
2.5.2 Comparação entre espécies e eficiência na melhoria das condições físicas do solo	31
2.5.3 Aplicabilidade das plantas de cobertura na agricultura moderna	33
2.6.. COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS.....	37
2.7 EFEITOS DA COMPACTAÇÃO NA POROSIDADE, INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E DESENVOLVIMENTO RADICULAR.....	40
2.8 SISTEMA RADICULAR, BIOPOROS E REESTRUTURAÇÃO FÍSICA DO SOLO	43
2.9 MATÉRIA ORGÂNICA, ATIVIDADE BIOLÓGICA E CICLAGEM DE NUTRIENTES EM SOLOS COMPACTADOS	46
3. MATERIAL E MÉTODOS	Erro! Indicador não definido.
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 RESULTADOS.....	54
4.2 DISCUSSÕES.....	57
5. CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

A compactação do solo constitui uma das principais formas de degradação física em sistemas agrícolas, pois compromete a estrutura do solo, reduz a porosidade, dificulta a infiltração de água e limita o desenvolvimento radicular das culturas. Esse processo está associado, principalmente, ao tráfego intenso de máquinas agrícolas, ao preparo inadequado do solo, ao manejo realizado em condições impróprias de umidade e à ausência de cobertura vegetal permanente. Como consequência, o solo passa a apresentar menor capacidade de armazenamento de água, menor circulação de ar e maior resistência ao crescimento das raízes, fatores que podem comprometer a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A conservação do solo, nesse contexto, torna-se indispensável para a manutenção da produtividade agrícola e para a preservação dos recursos naturais. O solo não deve ser compreendido apenas como suporte físico para as plantas, mas como um ambiente vivo, formado por componentes físicos, químicos e biológicos que interagem continuamente. Quando esse equilíbrio é alterado por práticas agrícolas inadequadas, ocorre a degradação da qualidade do solo, refletindo em perdas produtivas, aumento da dependência de insumos e maior vulnerabilidade das lavouras a períodos de estiagem e processos erosivos.

Entre as estratégias conservacionistas utilizadas para minimizar os efeitos da compactação, destacam-se as plantas de cobertura. Essas espécies são utilizadas em sistemas agrícolas com a finalidade de proteger a superfície do solo, produzir biomassa, aumentar o teor de matéria orgânica, favorecer a atividade biológica e melhorar a estrutura física do solo. Além disso, determinadas espécies apresentam sistemas radiculares vigorosos e profundos, capazes de explorar camadas compactadas, formar canais naturais e contribuir para a melhoria da porosidade e da infiltração de água. Dessa forma, as plantas de cobertura podem atuar como uma alternativa importante na redução dos efeitos da compactação, especialmente quando associadas ao plantio direto, à rotação de culturas e ao manejo adequado da palhada.

A utilização de plantas de cobertura também se relaciona com outros benefícios agronômicos e ambientais, como a ciclagem de nutrientes, o controle de

plantas daninhas, a proteção contra o impacto das gotas de chuva, a redução do escoamento superficial e o estímulo à biodiversidade do solo. No entanto, a eficiência dessas plantas depende de diversos fatores, como a espécie utilizada, o tipo de solo, as condições climáticas, a época de semeadura, a produção de biomassa e o sistema de manejo adotado. Por isso, torna-se necessário reunir e analisar informações científicas disponíveis, a fim de compreender quais mecanismos explicam a contribuição das plantas de cobertura na melhoria da qualidade física do solo.

Diante desse cenário, este trabalho busca responder à seguinte questão: de que forma as plantas de cobertura contribuem para a redução da compactação do solo e para a melhoria de atributos físicos, como porosidade, infiltração de água e desenvolvimento radicular, em sistemas agrícolas? A investigação parte da necessidade de sistematizar estudos já publicados sobre o tema, reunindo evidências que permitam compreender os efeitos das plantas de cobertura na conservação do solo e na sustentabilidade agrícola.

A relevância deste estudo está em oferecer uma síntese bibliográfica sobre o uso de plantas de cobertura como estratégia para a melhoria da estrutura física do solo, especialmente em áreas agrícolas sujeitas à compactação. Ao reunir informações sobre espécies utilizadas, mecanismos de atuação, benefícios e limitações dessa prática, a pesquisa pode contribuir para o entendimento técnico e científico do tema, auxiliando produtores, estudantes, pesquisadores e profissionais da área agrônoma na adoção de práticas mais sustentáveis.

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, desenvolvida a partir da análise de livros, artigos científicos, documentos técnicos e publicações relacionadas à compactação do solo, plantas de cobertura, conservação do solo, matéria orgânica, porosidade, infiltração de água, sistema radicular e manejo conservacionista. A monografia está estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, o problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos. O segundo capítulo corresponde ao referencial teórico, abordando a degradação do solo, os impactos da compactação e o papel das plantas de cobertura na melhoria das condições físicas do solo. O terceiro capítulo descreve os materiais e métodos utilizados na revisão bibliográfica. O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões, organizando as principais evidências encontradas na literatura. Por fim, o quinto capítulo reúne as conclusões do estudo, destacando as

contribuições das plantas de cobertura para a redução da compactação do solo e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar, por meio de revisão bibliográfica, a influência das plantas de cobertura na redução da compactação do solo em sistemas agrícolas, considerando seus efeitos sobre a estrutura física, a porosidade, a infiltração de água e o desenvolvimento radicular.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever os principais fatores que contribuem para a compactação do solo e seus impactos na produtividade agrícola;
- Identificar as espécies de plantas de cobertura mais utilizadas na agricultura e seus benefícios para a melhoria da estrutura física do solo;
- Sistematizar informações da literatura sobre a contribuição das plantas de cobertura para a formação de bioporos, o aumento da porosidade, a infiltração de água e o desenvolvimento radicular;
- Discutir a aplicabilidade das plantas de cobertura como estratégia conservacionista em diferentes contextos agrícolas, considerando seus benefícios, limitações e relação com a sustentabilidade da produção.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DEGRADAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

A degradação do solo é um dos maiores desafios enfrentados pela agricultura moderna, afetando diretamente a produtividade agrícola e a sustentabilidade dos sistemas de produção (Lal, 2015). Esse processo pode ocorrer de diferentes formas, incluindo a erosão, a compactação, a perda de matéria orgânica, a redução da fertilidade e a alteração da estrutura física do solo. Entre essas formas de degradação, a erosão se destaca pela remoção da camada superficial do solo, rica em nutrientes e matéria orgânica, devido à ação da água, do vento ou de práticas agrícolas inadequadas (Pimentel *et al.*, 1995).

A remoção dessa camada reduz significativamente a fertilidade do solo, afetando o crescimento das culturas e tornando as terras agrícolas menos produtivas ao longo do tempo (FAO, 2019). Solos degradados demandam maior uso de insumos, como fertilizantes e corretivos, elevando os custos de produção e aumentando os impactos ambientais (Montgomery, 2007).

O transporte de sedimentos para rios e lagos provoca assoreamento, reduzindo sua capacidade de armazenamento e aumentando o risco de inundações (Boardman; Poesen, 2006).

Ademais, os sedimentos transportados frequentemente carregam resíduos de agroquímicos, contaminando fontes de água utilizadas para irrigação e abastecimento humano (Novotny; Olem, 1994). Dessa forma, a compreensão dos fatores que intensificam a degradação do solo e a busca por estratégias eficazes para sua mitigação são essenciais para garantir a sustentabilidade agrícola (FAO, 2021).

Tabela 1 - Principais formas de degradação física do solo e seus efeitos na agricultura

Forma de degradação	Causa predominante	Consequência principal	Impacto agrícola	Referências
Erosão hídrica	Chuvas intensas e ausência de cobertura vegetal	Perda da camada superficial do solo e de nutrientes	Redução da fertilidade e aumento do uso de fertilizantes	FAO (2021); Boardman e Poesen (2006)
Erosão eólica	Ventos fortes em solos secos e descobertos	Transporte de partículas finas	Redução da capacidade de retenção de água e empobrecimento do solo	ANA (2020); Pimentel e Burgess (2013)
Degradação antrópica / compactação do solo	Uso excessivo de maquinário e manejo inadequado	Compactação e degradação estrutural do solo	Diminuição da produtividade, menor infiltração de água e aumento dos custos de produção	Montgomery (2007); USP (2022)

Fonte: o autor (2026)

A erosão também afeta os recursos hídricos e a biodiversidade dos ecossistemas agrícolas. O transporte de sedimentos para rios e lagos provoca assoreamento, reduzindo sua capacidade de armazenamento e aumentando o risco de inundações (Boardman; Poesen, 2006). Ademais, os sedimentos transportados frequentemente carregam resíduos de agroquímicos, contaminando fontes de água utilizadas para irrigação e abastecimento humano (Novotny; Olem, 1994). Dessa forma, a compreensão dos fatores que intensificam a erosão e a busca por estratégias eficazes para sua mitigação são essenciais para garantir a sustentabilidade agrícola (FAO, 2021).

Além do efeito imediato nas águas, esses sedimentos e produtos químicos modificam o equilíbrio dos ecossistemas circunvizinhos, danificando a fauna e a flora que afetam essas fontes hídricas para viver. Com o passar do tempo, a qualidade da água se deteriora, o que pode impactar até a saúde das comunidades humanas nas proximidades. Assim, a degradação do solo se estende além da diminuição da produtividade agrícola, sendo também um problema ambiental e social.

2.1.1 Degradação do solo e produção de alimentos

A segurança alimentar global está diretamente ligada à capacidade de manter solos saudáveis e produtivos (Lal, 2009). No entanto, a degradação do solo compromete esse equilíbrio ao reduzir a disponibilidade de terras cultiváveis, diminuir a produtividade agrícola e afetar as propriedades físicas, químicas e

biológicas do solo.

Entre os processos de degradação, a erosão provoca a perda da camada superficial fértil, enquanto a compactação compromete a porosidade, a infiltração de água e o crescimento das raízes. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2019), aproximadamente 24 bilhões de toneladas de solo fértil são perdidas anualmente devido à erosão, impactando diretamente a produção agrícola. Essa perda leva ao aumento do uso de fertilizantes e outras práticas corretivas para compensar a degradação do solo (Montgomery, 2007).

Essa situação torna o sistema de produção agrícola mais dependente de insumos externos, o que encarece a produção e pode tornar o agricultor mais vulnerável a oscilações de preços no mercado. Além disso, o uso intensivo de insumos químicos, muitas vezes, não consegue restaurar todas as propriedades do solo perdidas com a erosão, o que significa que os ganhos obtidos com esses produtos podem ser temporários. A longo prazo, o solo continua se degradando, o que compromete a viabilidade econômica da propriedade rural.

A degradação do solo também acelera processos como a desertificação, comprometendo a produção de alimentos em regiões vulneráveis (Reynolds *et al.*, 2007). Solos degradados perdem a capacidade de retenção de água e nutrientes, tornando-se cada vez mais inférteis (Dregne, 2002). Esse fenômeno é particularmente preocupante em regiões semiáridas, onde a erosão pode acelerar a degradação do solo e dificultar a produção agrícola (Lal, 2015).

Para mitigar esse problema, práticas agrícolas sustentáveis, como plantio direto, rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura, têm se mostrado eficazes na redução da degradação, na proteção da estrutura do solo e na recuperação de sua fertilidade (Derpsch *et al.*, 2010). Políticas públicas também são fundamentais para incentivar essas práticas e garantir a preservação dos solos para as gerações futuras (Montgomery, 2007).

A adoção dessas práticas conservacionistas requer não apenas conhecimento técnico, mas também apoio financeiro e institucional. Muitos agricultores, principalmente os pequenos, enfrentam dificuldades para implementar essas técnicas por falta de recursos ou assistência técnica. Por isso, é necessário que governos, instituições de ensino e pesquisa e a sociedade como um todo se envolvam no incentivo à agricultura sustentável, promovendo capacitações, acesso

a tecnologias e a construção de políticas públicas que priorizem o uso racional e a conservação do solo.

2.1.2 Principais formas de degradação física do solo

A erosão do solo pode se manifestar de diferentes formas, dependendo das condições ambientais e do tipo de manejo agrícola adotado (Pimentel; Burgess, 2013). Os principais tipos incluem a erosão hídrica, a erosão eólica e a erosão antrópica, cada uma apresentando impactos específicos na sustentabilidade da produção agrícola (FAO, 2019).

A erosão hídrica ocorre quando a chuva e o escoamento superficial removem a camada fértil do solo (Boardman; Poesen, 2006). Esse processo é mais intenso em áreas agrícolas desprovidas de cobertura vegetal, onde a ação da água causa a formação de sulcos, ravinas e voçorocas (Lal, 2015). Estudos da Embrapa Solos (Embrapa, 2021) indicam que a erosão hídrica pode reduzir a produtividade agrícola em até 50% ao longo dos anos.

Esse tipo de erosão é mais comum em regiões tropicais, como o Brasil, onde o regime de chuvas é intenso em determinadas épocas do ano. Quando o solo não está protegido, a força da água remove rapidamente os nutrientes e a matéria orgânica, deixando para trás uma superfície empobrecida. A formação de ravinas e voçorocas, além de dificultar o manejo das áreas afetadas, também representa um risco de acidentes e limita a mecanização da lavoura.

A erosão eólica é predominante em regiões semiáridas e áridas, onde a baixa umidade e a escassa cobertura vegetal favorecem a remoção e transporte de partículas pelo vento (FAO, 2019). No Brasil, essa forma de erosão é comum no Nordeste, agravada pelas mudanças climáticas e pelo uso inadequado do solo (ANA, 2020).

Nessas regiões, o vento atua como um agente erosivo constante, especialmente durante os períodos de seca prolongada. A perda de partículas finas, como argilas e matéria orgânica, afeta a estrutura do solo e compromete sua capacidade de reter água e nutrientes. Esse tipo de erosão, embora muitas vezes menos visível que a hídrica, é igualmente prejudicial e exige medidas preventivas, como o uso de quebra-ventos, cobertura vegetal e práticas de manejo que reduzam a exposição do solo.

A degradação antrópica do solo é uma consequência direta das atividades humanas, especialmente do manejo inadequado do solo (Montgomery, 2007). Pesquisas conduzidas pela Universidade de São Paulo (Usp, 2022) demonstram que a compactação do solo pode reduzir em até 30% a produtividade de culturas agrícolas, tornando-se um fator crítico para a sustentabilidade da agricultura.

Esse tipo de degradação mostra como as práticas humanas, mesmo sem a ação direta da água ou do vento, podem comprometer o solo de forma significativa. O uso excessivo de máquinas agrícolas pesadas, por exemplo, compacta o solo e dificulta a infiltração da água e o desenvolvimento das raízes. Além disso, o desmatamento e a queima de vegetação nativa também expõem o solo, tornando-o mais vulnerável à erosão natural. Assim, a degradação antrópica reforça a importância do manejo consciente e sustentável do solo nas atividades agropecuárias.

2.2 IMPACTOS DA DEGRADAÇÃO FÍSICA DO SOLO NA AGRICULTURA

A degradação física do solo representa uma ameaça significativa à produtividade agrícola, afetando diretamente a disponibilidade de nutrientes essenciais, a estrutura física, a porosidade, a infiltração de água e o desenvolvimento radicular das culturas. Entre os principais processos de degradação, destacam-se a erosão e a compactação, ambas capazes de comprometer a qualidade do solo e reduzir sua capacidade produtiva.

Estima-se que entre 20 a 37 bilhões de toneladas de solo superficial sejam perdidas anualmente devido à erosão, resultando em uma redução considerável nos rendimentos das culturas e na capacidade do solo de armazenar e ciclar carbono, nutrientes e água (FAO, 2021). Essa perda de solo fértil não apenas diminui a produtividade das lavouras, mas também aumenta a dependência de fertilizantes químicos, elevando os custos de produção e potencialmente causando impactos ambientais adversos.

Figura 1 - Erosão em solos de agricultura inadequada



Fonte: Unipacs

A longo prazo, essa dependência de insumos externos pode comprometer a viabilidade econômica da propriedade rural, especialmente para pequenos e médios produtores. Além disso, a perda constante da camada superficial do solo leva a uma degradação contínua, dificultando a recuperação natural do solo e tornando a produção agrícola cada vez mais insustentável. Em muitas regiões, esse ciclo de perda e substituição de nutrientes com produtos químicos acaba resultando em solos empobrecidos e com baixa capacidade produtiva.

Além da perda de nutrientes, a degradação física do solo compromete a infiltração e a retenção de água no solo. Solos degradados apresentam menor capacidade de absorver e armazenar água, tornando-se mais suscetíveis à compactação e à seca. Estudos indicam que práticas agrícolas convencionais reduzem a infiltração de água, enquanto sistemas de manejo conservacionista, como

o plantio direto, melhoram essa capacidade, contribuindo para a mitigação dos efeitos da seca (FAO, 2019).

Essa redução da capacidade de infiltração agrava ainda mais os efeitos das estiagens prolongadas, pois o solo não consegue reter água suficiente para suprir as plantas em períodos críticos. Como consequência, as culturas ficam mais vulneráveis à falta de água, o que pode levar à queda na produção e à necessidade de irrigação artificial, aumentando ainda mais os custos. Além disso, o aumento da compactação reduz o espaço poroso entre as partículas do solo, dificultando o crescimento das raízes e limitando a absorção de nutrientes pelas plantas.

A sedimentação de corpos hídricos é outro impacto crítico associado à degradação do solo, especialmente quando ocorre perda de partículas pela erosão. O transporte de sedimentos para rios e reservatórios reduz sua capacidade de armazenamento e aumenta o risco de inundações. Além disso, os sedimentos podem conter resíduos de agroquímicos, afetando a qualidade da água e prejudicando ecossistemas aquáticos (Novotny; Olem, 1994).

Esses sedimentos, ao se acumularem no fundo dos rios e lagos, reduzem a profundidade dos corpos hídricos e alteram seu fluxo natural. Isso pode prejudicar o abastecimento de água para consumo humano, irrigação e até mesmo para geração de energia hidrelétrica. A poluição das águas com resíduos químicos compromete a saúde de organismos aquáticos e pode afetar toda a cadeia alimentar, incluindo a população humana que depende desses recursos.

Economicamente, a erosão impõe custos substanciais aos agricultores. A necessidade de corrigir a fertilidade do solo e investir em insumos adicionais aumenta os gastos de produção. Estima-se que a erosão do solo cause uma perda anual de 7,6 milhões de toneladas na produção global de cereais, afetando negativamente a rentabilidade das propriedades agrícolas (FAO, 2021).

Além disso, os prejuízos causados pela degradação do solo vão além da redução da colheita. Muitos produtores precisam investir em obras de contenção, replantio de áreas degradadas e aquisição de tecnologias para mitigar os efeitos da degradação. Esses custos extras dificultam o planejamento financeiro e podem levar à inviabilidade de muitas atividades agropecuárias, principalmente em regiões com baixo suporte técnico e infraestrutura limitada.

2.3 ESTRATÉGIAS CONSERVACIONISTAS PARA A REDUÇÃO DA DEGRADAÇÃO DO SOLO

Diante dos impactos negativos da degradação do solo, a adoção de práticas conservacionistas é essencial para promover a sustentabilidade agrícola e manter a qualidade física, química e biológica dos sistemas produtivos. O plantio direto é uma técnica eficaz que preserva a cobertura do solo, reduz sua exposição ao impacto das chuvas e contribui para a manutenção de sua estrutura. No Brasil, a área cultivada com plantio direto aumentou de 17,9 milhões de hectares em 2006 para 33 milhões de hectares em 2017, representando um crescimento de 84,9% (Derpsch *et al.*, 2020).

Essa técnica também contribui para o aumento da matéria orgânica no solo e melhora sua estrutura, favorecendo o desenvolvimento radicular, a retenção de água e a redução dos efeitos da compactação. Além disso, o plantio direto reduz a emissão de carbono na atmosfera, uma vez que diminui a necessidade de revolvimento do solo com máquinas agrícolas. Dessa forma, essa prática beneficia tanto o ambiente quanto a economia do produtor rural.

A rotação de culturas é outra prática benéfica, pois melhora a estrutura do solo, aumenta a matéria orgânica e reduz a incidência de pragas e doenças. Além disso, a alternância entre espécies com diferentes sistemas radiculares favorece a exploração de distintas camadas do solo, contribuindo para a melhoria da porosidade e para a redução de problemas associados à compactação. Estudos demonstram que sistemas diversificados de rotação podem aumentar a produção de alimentos e reduzir a necessidade de fertilizantes químicos, contribuindo para a sustentabilidade agrícola (Nature Communications, 2023).

Essa diversificação das culturas quebra o ciclo de pragas específicas e promove uma maior eficiência na utilização dos nutrientes disponíveis no solo. Além disso, culturas diferentes apresentam sistemas radiculares variados, que exploram diferentes camadas do solo, ajudando a evitar a compactação e a melhorar a aeração do solo. Com isso, a saúde do solo é preservada, aumentando sua resiliência e longevidade produtiva.

Tabela 2 - Estratégias conservacionistas e seus efeitos sobre a qualidade do solo

Prática conservacionista	Efeito principal sobre o solo	Benefícios adicionais	Contribuição para a conservação do solo	Fonte
Plantio direto	Preserva a estrutura do solo e reduz o impacto direto das chuvas	Aumento da matéria orgânica e retenção de água	Favorece a estabilidade estrutural do solo e reduz processos de degradação física	Derpsch <i>et al.</i> (2020)
Rotação de culturas	Melhora a estrutura do solo e diversifica a exploração radicular	Reduz pragas e doenças e favorece a ciclagem de nutrientes	Contribui para a melhoria da fertilidade e da qualidade física do solo	Nature Communications (2023)
Terraceamento	Reduz o escoamento superficial da água	Diminui o assoreamento e a perda de solo em áreas declivosas	Auxilia no controle da erosão e na conservação da água no solo	Science of the Total Environment (2020)
Cobertura vegetal	Protege o solo e reduz a evaporação	Aumenta a biodiversidade, a matéria orgânica e a fertilidade	Favorece a proteção superficial e melhora a qualidade física, química e biológica do solo	FAO (2021); USDA (2021)
Compostagem e adubos orgânicos	Melhora a estrutura do solo e a retenção de água	Reduz a dependência de insumos químicos	Contribui para o aumento da matéria orgânica e para a melhoria da atividade biológica do solo	Journal of Environmental Management (2020)

Fonte: o autor (2026)

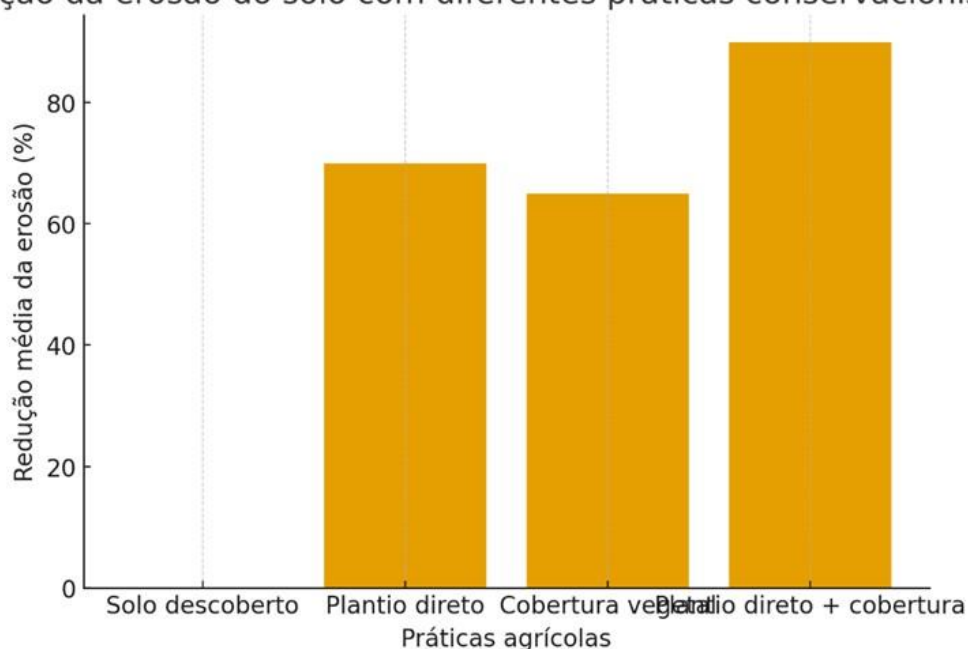
O uso de plantas de cobertura também desempenha um papel crucial na proteção e melhoria da qualidade do solo. Essas plantas formam uma cobertura vegetal que protege a superfície contra a ação erosiva da chuva e do vento, além de melhorar a infiltração de água, aumentar a matéria orgânica e favorecer a estrutura física do solo. A implementação de plantas de cobertura tem sido associada à redução significativa da erosão e à melhoria da qualidade do solo (USDA, 2021).

Espécies como aveia, milheto, crotalária e nabo forrageiro são amplamente utilizadas devido à sua capacidade de crescimento rápido e adaptação a diferentes condições climáticas. Essas plantas, ao serem manejadas corretamente, ainda podem ser incorporadas ao solo, contribuindo com nutrientes naturais e reduzindo a necessidade de insumos químicos. Além disso, algumas espécies apresentam sistemas radiculares vigorosos, capazes de explorar diferentes profundidades do solo, favorecendo a formação de canais naturais e contribuindo para a melhoria da porosidade. Outro benefício é o controle de plantas daninhas, que tendem a diminuir

com a presença de cobertura vegetal densa.

Em áreas com declividade acentuada, a construção de terraços é uma medida eficaz para controlar o escoamento superficial e prevenir a formação de sulcos erosivos. Os terraços funcionam como barreiras físicas que reduzem a velocidade da água, facilitando sua infiltração no solo e minimizando a perda de sedimentos. Estudos indicam que técnicas de terraceamento podem reduzir em até 93% a perda de solo em determinadas regiões (Science of The Total Environment, 2020).

Figura 2 - Redução de erosão do solo em diferentes práticas conservacionista (%)
Redução da erosão do solo com diferentes práticas conservacionistas (%)



Descrição: observa-se que as práticas conservacionistas, especialmente o plantio direto associado ao uso de plantas de cobertura, reduzem de forma significativa as perdas de solo em comparação ao cultivo convencional sem proteção.

Fonte: adaptado de Derpsch *et al.* (2020); FAO (2021).

O terraceamento também ajuda a criar microambientes mais estáveis para o desenvolvimento das plantas, especialmente em regiões montanhosas, onde o risco de degradação é elevado. Apesar de exigir um investimento inicial maior, essa técnica proporciona benefícios duradouros, contribuindo para a conservação do solo e da água. Em algumas regiões, programas de incentivo ao terraceamento têm sido fundamentais para recuperar áreas críticas de degradação.

O manejo sustentável de resíduos orgânicos, por meio da compostagem e do uso de adubos naturais, também contribui para a melhoria da qualidade do solo e para

a redução da erosão. A adição de matéria orgânica aumenta a capacidade de retenção de água e melhora a estrutura do solo, tornando-o mais resistente à erosão (Journal of Environmental Management, 2020).

Além de evitar o desperdício de resíduos da atividade agrícola, essa prática contribui para o fechamento dos ciclos de nutrientes dentro da propriedade. A compostagem adequada reduz a emissão de gases de efeito estufa e produz um composto rico em nutrientes, que melhora as condições físicas, químicas e biológicas do solo. Esse material orgânico atua como um condicionador do solo, favorecendo a vida microbiana e promovendo um ambiente mais equilibrado para o crescimento das plantas.

A implementação dessas práticas conservacionistas não apenas mitiga os efeitos da degradação do solo, mas também promove a sustentabilidade e a resiliência dos sistemas agrícolas, garantindo a conservação dos recursos naturais e a viabilidade econômica a longo prazo.

É fundamental que essas práticas sejam acompanhadas de assistência técnica contínua e de políticas públicas que incentivem sua adoção, especialmente entre pequenos produtores. A capacitação dos agricultores, aliada ao acesso a tecnologias acessíveis, pode transformar a realidade de muitas regiões afetadas pela erosão, promovendo uma agricultura mais justa, produtiva e ambientalmente correta.

2.4 O SURGIMENTO DAS PLANTAS DE COBERTURA COMO ALTERNATIVA PARA A CONSERVAÇÃO DO SOLO

A adoção de plantas de cobertura tem se consolidado como uma estratégia fundamental para a conservação do solo, proporcionando benefícios que vão além da proteção contra a erosão. Segundo Derpsch *et al.* (2010), essas plantas melhoram a estrutura física, química e biológica do solo, promovendo a retenção de umidade, o incremento da matéria orgânica e a manutenção da biodiversidade microbiana. Além disso, ao favorecerem a formação de raízes e a permanência de resíduos vegetais sobre a superfície, as plantas de cobertura contribuem para melhorar a porosidade, a infiltração de água e a resistência do solo aos processos de degradação física, incluindo a compactação. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2021) destaca que o uso de plantas de cobertura pode reduzir a erosão em até 80%, além de melhorar a infiltração de água e a retenção de nutrientes,

fatores essenciais para a sustentabilidade agrícola.

Além disso, essas plantas desempenham um papel importante na ciclagem de nutrientes, pois suas raízes exploram diferentes camadas do solo, absorvendo elementos minerais que posteriormente são disponibilizados para as culturas comerciais após a decomposição dos resíduos vegetais. Isso cria um ciclo contínuo de nutrição do solo, diminuindo a necessidade de adubação química e promovendo um sistema mais equilibrado.

No contexto do plantio direto, a importância das plantas de cobertura torna-se ainda mais evidente. Esse sistema busca minimizar o revolvimento do solo, preservando sua estrutura e reduzindo os impactos negativos da agricultura convencional, como a compactação e a degradação da fertilidade (Bolliger *et al.*, 2006). O uso dessas plantas permite a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo, o que protege contra o impacto das gotas de chuva, reduz a dispersão de partículas e minimiza a perda de solo por erosão hídrica (Reicosky, 2015). Em regiões com alta pluviosidade, essa estratégia é fundamental para evitar o escoamento superficial e melhorar a infiltração da água, promovendo um melhor aproveitamento dos recursos hídricos e favorecendo a manutenção da estrutura física do solo.

Outra vantagem importante está na capacidade das plantas de cobertura em suprimir plantas daninhas, reduzindo a necessidade de herbicidas. A cobertura vegetal densa bloqueia a entrada de luz solar, dificultando o crescimento das espécies indesejadas e promovendo um ambiente mais limpo para as culturas principais.

Agricultores e pesquisadores vêm buscando alternativas sustentáveis para maximizar a produtividade agrícola sem comprometer a qualidade do solo. O manejo inadequado, aliado ao uso excessivo de fertilizantes sintéticos, defensivos agrícolas e operações mecanizadas intensivas, tem acelerado os processos de degradação, tornando o solo menos fértil, mais suscetível à compactação e aumentando sua dependência de insumos externos (Lal, 2015). Esse quadro impacta não apenas os custos de produção, mas também o meio ambiente, uma vez que a degradação do solo pode levar ao assoreamento de rios e à contaminação de lençóis freáticos por agroquímicos (Tilman *et al.*, 2002).

Diante disso, é cada vez mais necessário que o produtor rural invista em práticas que proporcionem benefícios a longo prazo, mesmo que os resultados não sejam imediatos. A cobertura vegetal constante ajuda a formar uma camada protetora que impede a perda da camada superficial do solo, além de estimular a vida biológica,

como minhocas e microrganismos, fundamentais para a saúde do ambiente agrícola.

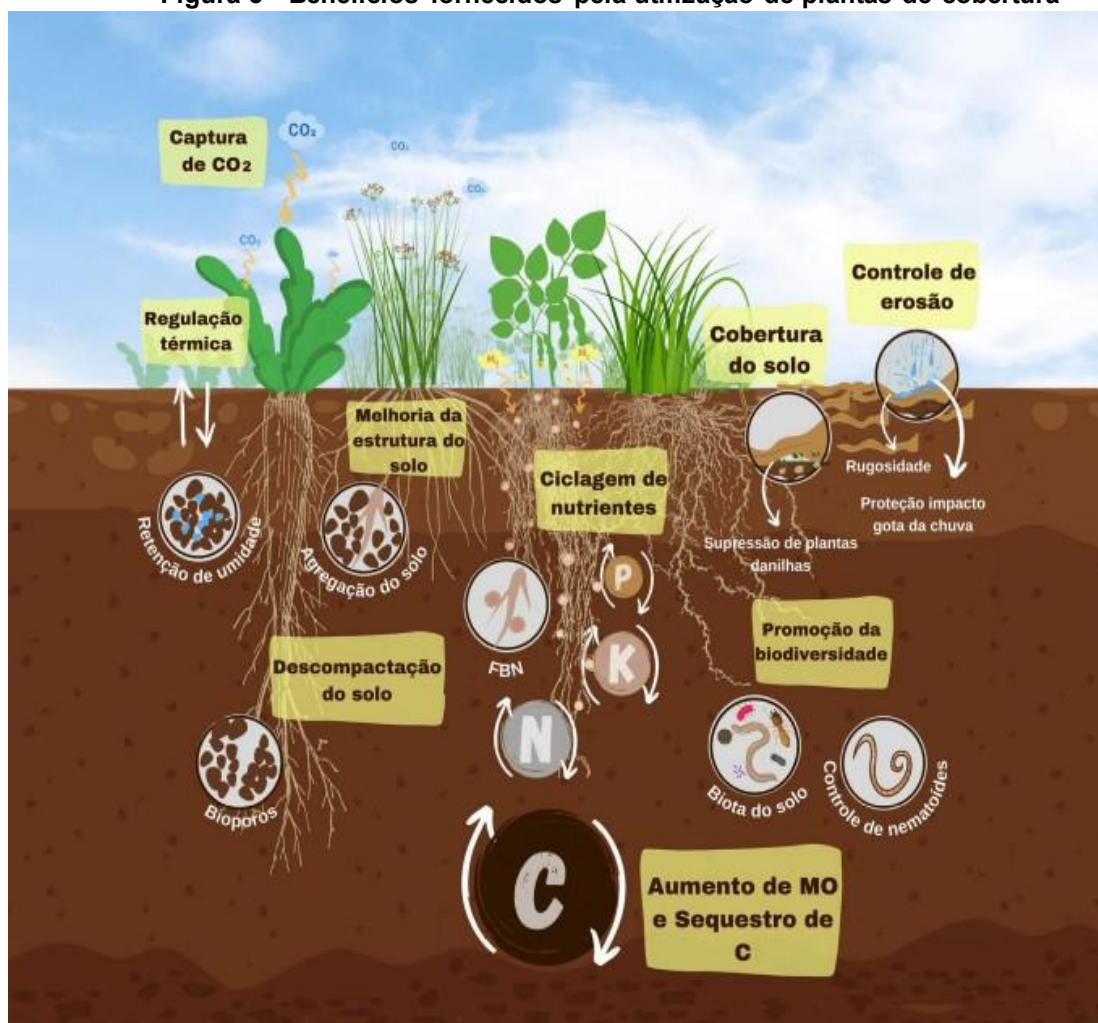
Diante dessa realidade, as plantas de cobertura emergem como uma alternativa eficaz para restaurar a fertilidade do solo, promover a ciclagem de nutrientes e proporcionar um ambiente mais equilibrado para o desenvolvimento das culturas agrícolas (Altieri; Nicholls, 2017). Elas também representam uma alternativa viável para pequenas e médias propriedades, pois podem ser cultivadas com baixo custo e adaptadas a diferentes realidades regionais, contribuindo para a democratização do acesso a práticas sustentáveis.

2.4.1 O papel das plantas de cobertura na melhoria da qualidade do solo

A melhoria da qualidade do solo é um dos pilares fundamentais da agricultura sustentável, pois evita a degradação dos recursos naturais e assegura a produtividade a longo prazo. Dentre as diversas práticas conservacionistas disponíveis, o uso de plantas de cobertura tem se destacado como uma estratégia eficiente na proteção e melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo. Segundo Derpsch *et al.* (2010), a cobertura vegetal atua diretamente na redução dos processos de degradação, promovendo benefícios que vão além da simples proteção mecânica da superfície do solo. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2020) enfatiza que a adoção de práticas conservacionistas como o uso de plantas de cobertura pode reduzir em até 80% as perdas de solo por erosão, tornando-se, assim, uma ferramenta essencial na manutenção da sustentabilidade agrícola.

Além disso, o uso constante de cobertura vegetal proporciona um ambiente mais estável para o solo, evitando variações bruscas de temperatura que afetam tanto a atividade microbiana quanto o desenvolvimento radicular. A cobertura age como um isolante térmico natural, protegendo o solo da exposição direta ao sol e mantendo a temperatura em níveis mais adequados para a vida no solo.

Figura 3 - Benefícios fornecidos pela utilização de plantas de cobertura



Fonte: Aliare/ Bruna Emanuele Schiebelbein

O impacto positivo das plantas de cobertura sobre a estrutura do solo é amplamente documentado na literatura. A presença contínua de raízes no solo contribui para o aumento da porosidade, melhorando a infiltração de água e a circulação de ar nos perfis mais profundos (Brady; Weil, 2016). Esse fator é determinante para o desenvolvimento das culturas comerciais, pois um solo bem estruturado favorece o crescimento radicular, proporciona maior resistência a períodos de estiagem e reduz a necessidade de irrigação excessiva (Lal, 2015). Além disso, o revolvimento excessivo do solo na agricultura convencional pode levar à compactação e à degradação de sua estrutura física, problemas que podem ser mitigados pelo uso contínuo de cobertura vegetal (Bolliger *et al.*, 2006).

Outro ponto relevante é que as raízes das plantas de cobertura criam canais naturais no solo, que funcionam como caminhos facilitadores para a água da chuva e

para as raízes das culturas seguintes. Esses canais melhoram a penetração da água, evitando o acúmulo superficial e reduzindo os riscos de enxurradas e erosão. Com isso, há uma maior conservação da umidade no solo e melhor aproveitamento da água disponível, especialmente em períodos de seca. Além disso, a formação desses canais contribui para reduzir os efeitos da compactação, pois favorece a reorganização estrutural do solo e melhora as condições para o crescimento radicular.

A adição de matéria orgânica ao solo é outro benefício significativo proporcionado pelas plantas de cobertura. Durante o seu ciclo de vida e posterior decomposição, essas plantas promovem a liberação gradual de nutrientes essenciais, enriquecendo naturalmente o solo e reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos (Altieri; Nicholls, 2017). O uso de leguminosas como adubo verde é particularmente vantajoso, pois essas espécies são capazes de fixar nitrogênio atmosférico no solo por meio da simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, promovendo a reciclagem de nutrientes e a melhoria da fertilidade do solo (Hungria; Vargas, 2000).

De acordo com a FAO (2020), a fixação biológica de nitrogênio pode suprir até 50% da demanda desse nutriente para as culturas comerciais, reduzindo significativamente os custos de produção e os impactos ambientais associados à aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos. Além disso, o aumento da matéria orgânica contribui para maior agregação das partículas do solo, melhorando sua estrutura e reduzindo sua suscetibilidade à compactação.

Além do nitrogênio, as plantas de cobertura também auxiliam na ciclagem de outros nutrientes, como fósforo, potássio, cálcio e magnésio, que muitas vezes se encontram em profundidade no solo, fora do alcance das raízes das culturas comerciais. As raízes das plantas de cobertura exploram essas camadas mais profundas, absorvendo os nutrientes e trazendo-os de volta à superfície, onde podem ser aproveitados pelas culturas subsequentes.

Outro aspecto relevante do uso de plantas de cobertura na melhoria dos sistemas agrícolas é a sua influência na supressão de plantas daninhas. A cobertura vegetal reduz a incidência de espécies invasoras ao criar uma barreira física que dificulta a germinação e o estabelecimento de plântulas indesejadas (Tilman *et al.*, 2002). Esse efeito diminui a necessidade do uso de herbicidas, promovendo um manejo mais sustentável e menos dependente de insumos químicos.

Segundo Derpsch *et al.* (2010), a redução da infestação de plantas daninhas em sistemas que utilizam cobertura vegetal pode atingir índices superiores a 70%, tornando

essa prática uma alternativa viável para o manejo integrado de plantas invasoras. Além disso, a palhada deixada sobre o solo contribui para a manutenção da umidade, reduzindo a evaporação e aumentando a eficiência no uso da água (Machado; Silva, 2021).

A decomposição lenta da palhada também tem papel importante na liberação gradual de nutrientes, evitando perdas por lixiviação e garantindo um fornecimento mais contínuo às plantas. Essa liberação moderada é especialmente importante em ambientes tropicais, onde as chuvas intensas podem levar os nutrientes para camadas mais profundas do solo.

Diante dos inúmeros benefícios proporcionados pelo uso de plantas de cobertura, fica evidente que essa prática representa um avanço significativo na busca por sistemas agrícolas mais sustentáveis e solos de melhor qualidade. A sua adoção deve ser incentivada não apenas pelo setor produtivo, mas também por políticas públicas que visem à conservação dos recursos naturais e à redução dos impactos ambientais da atividade agrícola. A implementação de estratégias como o plantio direto, a rotação de culturas e o uso de adubação verde deve ser combinada com o manejo adequado da fertilidade e da estrutura do solo, garantindo um sistema produtivo mais resiliente e equilibrado. Conforme ressaltado por Lal (2015), a saúde do solo está diretamente ligada à capacidade produtiva das lavouras e à segurança alimentar global, sendo, portanto, fundamental investir em práticas agrícolas que promovam a sua conservação e regeneração.

Com base nisso, é essencial que programas de extensão rural e capacitação de agricultores tragam informações práticas sobre como implementar essas técnicas no campo. Muitas vezes, o produtor conhece os benefícios teóricos, mas enfrenta dificuldades para aplicar no dia a dia. Incentivos governamentais, como linhas de crédito específicas e assistência técnica gratuita, podem ser decisivos para aumentar a adoção dessa prática e transformar a realidade do meio rural.

Por fim, vale destacar que a escolha das espécies para cobertura deve ser feita com base nas condições locais, como tipo de solo, clima e rotação de culturas. A seleção adequada aumenta a eficiência do sistema, pois cada espécie possui características únicas que podem favorecer determinados objetivos, como o controle de pragas, a melhoria da estrutura do solo ou a fixação de nitrogênio. Por isso, a pesquisa científica deve caminhar junto com o produtor, promovendo soluções que sejam ao mesmo tempo eficazes, econômicas e ambientalmente responsáveis.

O uso de plantas de cobertura representa um avanço significativo na busca por uma agricultura mais sustentável e produtiva. A escolha adequada das espécies, aliada a boas práticas de manejo, pode reduzir custos com insumos, melhorar a saúde do solo e contribuir para a preservação dos recursos naturais. Como o aumento da adoção dessa técnica, a expectativa é que a agricultura brasileira continue evoluindo em direção a um modelo mais regenerativo e eficiente.

2.5 PESQUISAS SOBRE PLANTAS DE COBERTURA

O avanço das pesquisas na área agronômica tem sido fundamental para ampliar o conhecimento sobre os impactos positivos das plantas de cobertura na qualidade do solo e na produtividade agrícola. Estudos demonstram que essas plantas desempenham um papel essencial na conservação dos recursos naturais, contribuindo diretamente para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Duarte Júnior *et al.*, 2012).

O uso contínuo de plantas de cobertura tem sido estudado em diferentes condições edafoclimáticas e sistemas agrícolas, possibilitando soluções eficazes para problemas como erosão, compactação do solo e baixa fertilidade (Torres *et al.*, 2014). Além disso, há evidências científicas que indicam que essas plantas promovem o aumento da biodiversidade do solo, favorecendo a presença de microrganismos benéficos e melhorando a eficiência da ciclagem de nutrientes (Hungria *et al.*, 2009).

Com o passar dos anos, a intensificação das pesquisas vem permitindo um melhor entendimento sobre como cada espécie de planta de cobertura interage com o solo, o clima e as culturas comerciais. Isso tem possibilitado a formulação de recomendações mais específicas para diferentes realidades agrícolas, contribuindo para a adoção de práticas mais adaptadas às condições locais.

No contexto da degradação física do solo, essas pesquisas também permitem identificar espécies com maior potencial para melhorar a estrutura, favorecer a formação de poros, ampliar a infiltração de água e reduzir os efeitos da compactação. Assim, o produtor consegue fazer escolhas mais conscientes, melhorando a eficiência de seu sistema produtivo.

2.5.1 Benefícios das plantas de cobertura para a estrutura do solo

As plantas de cobertura trazem uma série de benefícios que vão muito além da simples proteção superficial do solo. Entre seus principais efeitos estão a melhoria da estrutura física, o aumento da porosidade, a redução da compactação, a maior infiltração de água e a conservação da matéria orgânica. A presença de uma camada vegetal sobre o solo reduz significativamente a remoção de partículas pela água da chuva, minimizando as perdas de nutrientes e matéria orgânica (Embrapa, 2021). Segundo estudo de Calegari *et al.* (1993), espécies como o nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*) e o milheto (*Pennisetum glaucum*) são eficientes na proteção do solo, pois apresentam rápido crescimento, cobertura uniforme e sistemas radiculares capazes de contribuir para a melhoria das condições físicas do solo.

Além da proteção física, essas plantas funcionam como uma barreira natural contra os impactos das gotas de chuva, reduzindo o respingo do solo e impedindo a formação de crostas superficiais. Essas crostas dificultam a penetração da água e o crescimento das raízes, agravando problemas relacionados à baixa infiltração e à degradação estrutural. Dessa forma, a cobertura vegetal contribui para maior aproveitamento da água da chuva, redução da ocorrência de enxurradas e melhoria das condições físicas necessárias ao desenvolvimento das culturas.

Tabela 3 - Benefícios físicos, químicos e biológicos das plantas de cobertura para a qualidade do solo

Dimensão	Benefício específico	Mecanismo de ação	Impacto para a agricultura
Física	Redução da compactação	Raízes profundas formam canais naturais no solo	Melhora a infiltração de água e favorece o crescimento radicular
Física	Aumento da porosidade	Formação de agregados estáveis e melhoria da estrutura do solo	Aumenta a infiltração de água e reduz o escoamento superficial
Química	Fixação biológica de nitrogênio	Associação simbiótica com bactérias do gênero <i>Rhizobium</i>	Reduz a necessidade de adubação nitrogenada e contribui para a fertilidade do solo
Química	Ciclagem de nutrientes	Absorção de nutrientes em camadas profundas e liberação durante a decomposição da biomassa	Aumenta a disponibilidade de nutrientes para as culturas subsequentes
Biológica	Estímulo à microbiota do solo	Aumento da matéria orgânica e da atividade microbiana	Melhora a saúde, a resiliência e o equilíbrio biológico do solo

Fonte: o autor (2026).

Outro benefício amplamente estudado é a melhoria da estrutura física do solo. As raízes das plantas de cobertura auxiliam na formação de agregados estáveis,

aumentando a porosidade e favorecendo a infiltração de água (Castro *et al.*, 2012). Em um estudo realizado pelo Instituto Agronômico do Paraná (Iapar),

observou-se que áreas cultivadas com adubação verde apresentaram uma redução significativa na compactação do solo, o que permitiu um melhor desenvolvimento radicular das culturas subsequentes (Iapar, 2018).

Com uma estrutura mais solta e aerada, o solo favorece também a movimentação de organismos benéficos, como minhocas e fungos micorrízicos, que auxiliam na decomposição da matéria orgânica e na liberação de nutrientes. Isso contribui para a formação de um solo mais vivo, fértil e produtivo.

Além disso, as plantas de cobertura contribuem diretamente para a retenção de água e o aumento da matéria orgânica no solo. Segundo Salton *et al.* (2014), a biomassa produzida por essas plantas reduz a evaporação da água e melhora a capacidade de armazenamento hídrico, tornando os sistemas agrícolas mais resilientes a períodos de estiagem. Estudos da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/Usq) também indicam que a decomposição da biomassa das plantas de cobertura favorece a fertilidade do solo ao aumentar os teores de matéria orgânica e estimular a atividade microbiana benéfica (Esalq/Usq, 2020).

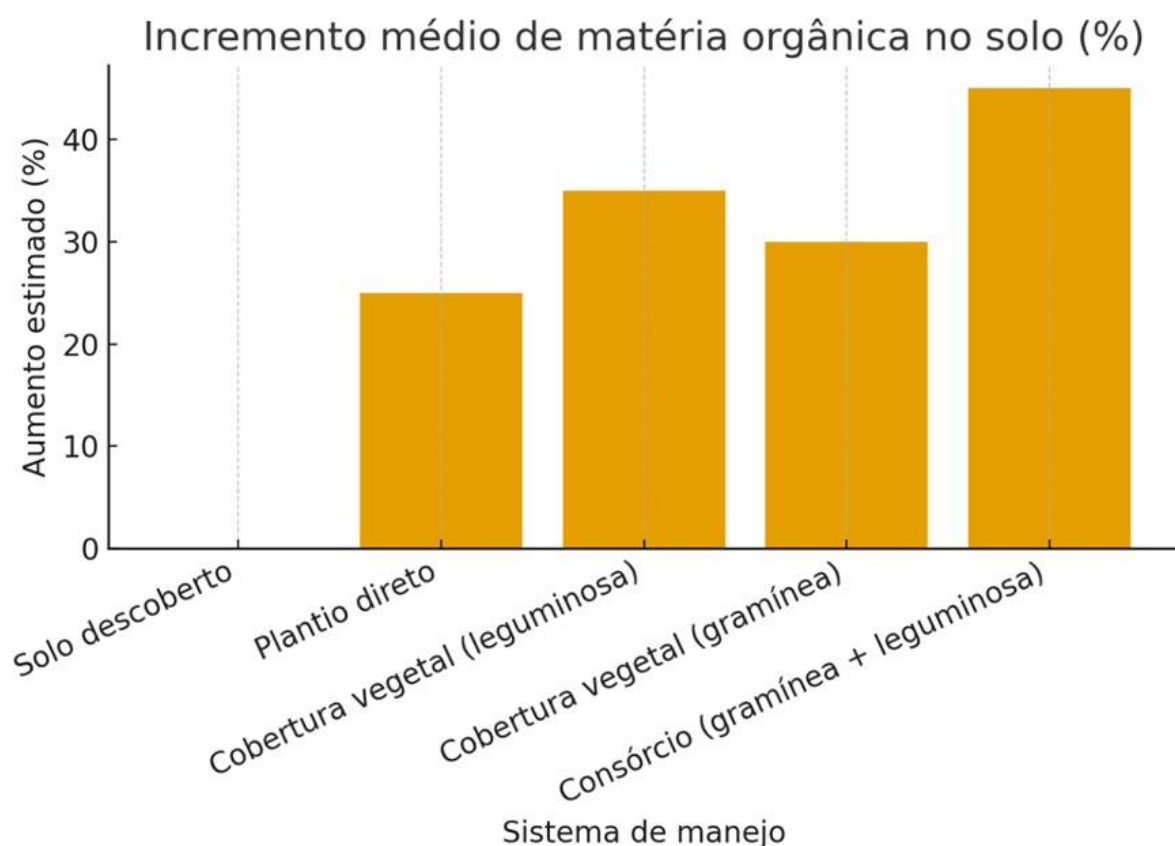
Essa matéria orgânica atua como uma esponja no solo, retendo água e nutrientes, o que é especialmente importante em regiões com clima seco ou com chuvas mal distribuídas. Além disso, a matéria orgânica melhora a coloração e a textura do solo, tornando-o mais fácil de manejar.

Outro aspecto importante é o controle de plantas daninhas. De acordo com os estudos conduzidos pela Embrapa, espécies como o centeio (*Secale cereale*) e a aveia-preta (*Avena strigosa*) possuem efeito alelopático sobre diversas espécies invasoras, inibindo sua germinação e crescimento (Embrapa, 2021). Esse efeito foi confirmado em pesquisas realizadas por Sodré Filho *et al.* (2017), que verificaram uma redução significativa na infestação de plantas daninhas em áreas onde foi utilizada a cobertura vegetal com leguminosas, como mucuna-preta (*Mucuna pruriens*) e feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*).

Com menos plantas invasoras competindo por luz, água e nutrientes, as culturas comerciais conseguem se desenvolver melhor, o que resulta em maior produtividade e menor necessidade de herbicidas. Isso contribui para a redução dos custos de produção e para a preservação da saúde do solo, da água e dos trabalhadores rurais.

Portanto, o uso de plantas de cobertura representa uma estratégia essencial para a conservação do solo, a melhoria da fertilidade e a redução da dependência de insumos químicos. A continuidade das pesquisas nessa área permitirá um aprofundamento ainda maior no entendimento de suas interações com diferentes sistemas produtivos, possibilitando a adoção de práticas cada vez mais eficientes e sustentáveis.

Figura 4 - Incremento médio de matéria orgânica no solo



Descrição: demonstra o efeito positivo das plantas de cobertura na adição de matéria orgânica, com destaque para os sistemas consorciados entre gramíneas e leguminosas, que proporcionam os maiores incrementos.

Fonte: adaptado de Hungria e Mendes (2015); Salton *et al.* (2014).

A adoção das plantas de cobertura não é apenas uma técnica de manejo, mas sim uma mudança de mentalidade, onde o solo deixa de ser visto como um simples suporte físico e passa a ser tratado como um organismo vivo, que precisa de cuidados constantes para manter sua capacidade produtiva.

2.5.2 Comparação entre espécies e eficiência na melhoria das condições físicas do solo

A eficiência das plantas de cobertura na conservação e melhoria das condições físicas do solo varia significativamente de acordo com a espécie utilizada, sendo essencial selecionar a mais adequada para cada situação agrícola. Estudos demonstram que diferentes grupos de plantas apresentam características específicas que influenciam tanto a proteção contra a erosão quanto a melhoria da estrutura, da porosidade, da infiltração de água e da fertilidade do solo. Nesse contexto, a comparação entre gramíneas e leguminosas é frequentemente abordada na literatura agrônoma, pois cada um desses grupos desempenha papéis distintos no manejo sustentável do solo.

A escolha adequada da planta de cobertura deve levar em conta diversos fatores, como o tipo de cultura comercial que será implantada posteriormente, o tempo disponível entre safras, o clima da região e o tipo de solo. Cada planta tem um comportamento diferente, e o conhecimento técnico é fundamental para garantir bons resultados. Além disso, quando o objetivo envolve a melhoria das condições físicas do solo, deve-se considerar também o tipo de sistema radicular, a produção de biomassa e a capacidade da espécie em favorecer a formação de poros e a agregação do solo.

Figura 5 - Principais plantas de cobertura de solo



Nota: Plantas de cobertura: sorgo, braquiária, crotalária, aveia preta, nabo forrageiro e amendoim forrageiro.

Fonte: AgroAdvance

Tabela 4 - Comparação entre espécies de plantas de cobertura e sua contribuição para a conservação do solo

Grupo botânico	Espécie	Principais benefícios agrônômicos	Funções na conservação do solo	Observações técnicas
Gramínea	Braquiária (<i>Urochloa spp.</i>)	Alta produção de biomassa; sistema radicular profundo; adaptação a solos tropicais	Reduz a compactação, melhora a infiltração de água e auxilia na proteção contra erosão	Indicada para sistemas integrados lavoura-pecuária; manejo por dessecação ou rolo-faca
Gramínea	Milheto (<i>Pennisetum glaucum</i>)	Crescimento rápido; tolerância à seca; boa cobertura superficial	Reduz o impacto das chuvas e aumenta a retenção de umidade	Recomendado para regiões quentes e com déficit hídrico
Leguminosa	Crotalária-júncea (<i>Crotalaria juncea</i>)	Fixação biológica de nitrogênio; incremento de matéria orgânica; ação nematicida	Melhora a fertilidade e contribui para a estruturação do solo	Apresenta alta produção de biomassa; indicada para rotação com soja e milho
Leguminosa	Mucuna-preta (<i>Mucuna pruriens</i>)	Fixação de nitrogênio; supressão de plantas daninhas; ciclagem de nutrientes	Protege o solo e reduz a infestação de espécies invasoras	Indicada para áreas degradadas; apresenta crescimento vigoroso
Brassicácea	Nabo-forrageiro (<i>Raphanus sativus</i> var. <i>oleiformis</i>)	Raiz pivotante profunda; reciclagem de nutrientes em camadas inferiores	Auxilia na descompactação biológica, favorece a infiltração de água e reduz a erosão superficial	Recomendado em rotação com gramíneas; possui decomposição rápida da biomassa
Poácea	Aveia-preta (<i>Avena strigosa</i>)	Alta cobertura do solo; tolerância ao frio; controle de plantas daninhas	Diminui a erosão laminar e melhora a agregação do solo	Indicada para regiões subtropicais e temperadas
Fabácea rasteira	Feijão-de-porco (<i>Canavalia ensiformis</i>)	Fixação de nitrogênio; cobertura densa do solo	Reduz a erosão e melhora a fertilidade do solo	Boa alternativa para pequenos produtores; exige manejo no florescimento

Fonte: adaptado de Embrapa (2021), Calegari *et al.* (2008), Hungria e Mendes (2015) e Soratto *et al.* (2022).

As gramíneas, como a braquiária (*Urochloa spp.*) e o milheto (*Pennisetum glaucum*), possuem sistemas radiculares fibrosos e profundos que promovem maior agregação do solo e resistência à erosão hídrica. Essas plantas criam uma cobertura densa que reduz o impacto direto das gotas de chuva sobre o solo, minimizando a desagregação das partículas e o escoamento superficial, fatores responsáveis pela

remoção de nutrientes e matéria orgânica. Segundo estudo de Zolin *et al.* (2021), a presença de cobertura vegetal proporciona maior infiltração de água e retenção de umidade, contribuindo para a proteção do solo contra chuvas erosivas.

Além disso, essas gramíneas são muito eficientes na produção de biomassa, o que ajuda na formação de uma camada espessa de palhada sobre o solo. Essa cobertura não só protege o solo, mas também atua como reserva de nutrientes que serão liberados lentamente durante a decomposição.

Já as leguminosas, como a crotalária (*Crotalaria juncea*) e a mucuna-preta (*Mucuna pruriens*), destacam-se pela capacidade de fixação biológica de nitrogênio, enriquecendo o solo e reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados. Além disso, a decomposição da biomassa dessas plantas libera nutrientes essenciais, melhorando a fertilidade do solo. Conforme aponta o estudo de Hungria e Mendes (2015), a fixação biológica de nitrogênio por leguminosas é uma estratégia sustentável para aumentar a produtividade agrícola nos trópicos.

Essas espécies são particularmente indicadas para áreas onde o solo apresenta baixa fertilidade ou deficiência de nitrogênio, pois ajudam a reequilibrar o sistema produtivo de forma natural e econômica.

A combinação de gramíneas e leguminosas em sistemas consorciados tem sido recomendada para otimizar os benefícios de ambas as categorias, resultando em solos mais férteis e estruturados ao longo das safras. A diversificação de plantas de cobertura melhora a biodiversidade do sistema, proporcionando maior equilíbrio ecológico e promovendo resistência a variações climáticas. Pesquisa realizada por Soratto *et al.* (2022) concluiu que a bio diversificação com uso de gramíneas e leguminosas como plantas de cobertura melhora a saúde do solo, o rendimento da soja e a resiliência a estresses climáticos.

O consórcio entre espécies ainda apresenta a vantagem de aproveitar os diferentes tipos de enraizamento e ciclo de vida das plantas. Enquanto as gramíneas protegem o solo rapidamente com sua cobertura densa, as leguminosas atuam enriquecendo a fertilidade ao longo do tempo. Essa complementaridade torna o sistema mais estável e produtivo.

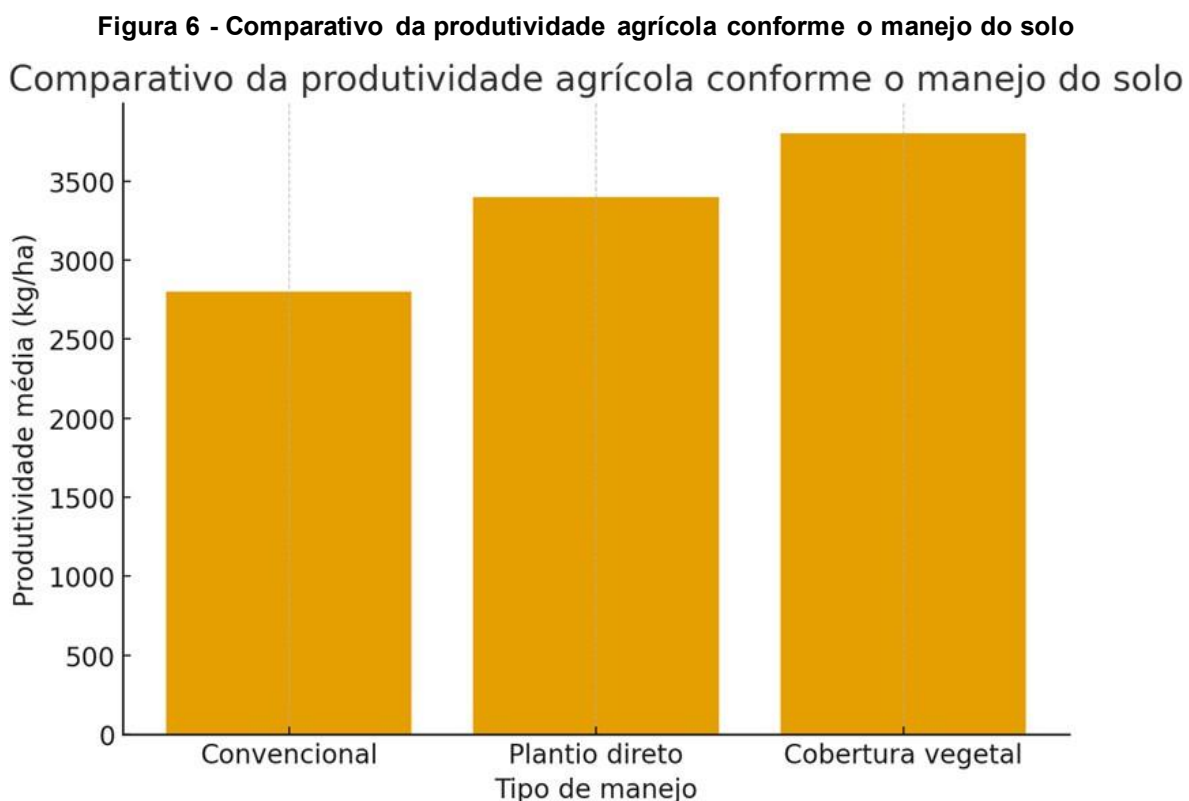
2.5.3 Aplicabilidade das plantas de cobertura na agricultura moderna

O uso de plantas de cobertura tem ganhado destaque nos sistemas produtivos

modernos, especialmente no plantio direto e na agricultura conservacionista. Essa prática tem sido amplamente adotada em países como Brasil, Estados Unidos e Argentina, visando minimizar os impactos ambientais da produção intensiva por meio da conservação do solo e da redução da dependência de fertilizantes sintéticos.

A preocupação com a sustentabilidade e a busca por práticas que garantam a continuidade da produção agrícola, sem comprometer os recursos naturais, têm impulsionado o interesse pelo uso de coberturas vegetais. Essas plantas não apenas protegem o solo, mas também contribuem para a construção de um ambiente agrícola mais equilibrado e produtivo.

No Brasil, a adoção do sistema de plantio direto, aliada ao uso de plantas de cobertura, tem demonstrado resultados positivos na manutenção da fertilidade do solo e no aumento da produtividade de culturas como soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e trigo (*Triticum aestivum*). De acordo com estudo de Zolin *et al.* (2021), áreas manejadas com cobertura vegetal apresentam menores taxas de compactação, maior teor de matéria orgânica e maior eficiência no uso da água, fatores determinantes para a produtividade agrícola sustentável.



Descrição: nota-se que o uso de cobertura vegetal e o sistema de plantio direto resultam em maior produtividade agrícola, devido à melhoria na estrutura do solo, maior retenção de água e disponibilidade de nutrientes.

Fonte: adaptado de Zolin *et al.* (2021); Soratto *et al.* (2022).

Esses resultados mostram que o uso contínuo das plantas de cobertura, associado a práticas adequadas de manejo, pode transformar áreas antes degradadas em solos produtivos e estáveis ao longo do tempo. Além disso, a cobertura do solo ajuda a controlar as variações de temperatura na superfície, protegendo as sementes e os microrganismos importantes para o desenvolvimento das culturas.

Tabela 5 - Diretrizes para a escolha de plantas de cobertura conforme o tipo de solo

Tipo de solo	Problema predominante	Espécies mais indicadas	Objetivo do uso
Arenoso	Baixa retenção de água e nutrientes	Braquiária, milho e feijão-de-porco	Aumentar a matéria orgânica, reduzir a evaporação e melhorar a retenção de umidade
Argiloso	Compactação e drenagem deficiente	Nabo-forrageiro e crotalária	Favorecer a descompactação biológica, melhorar a aeração e ampliar a infiltração de água
Latossolo vermelho	Perda de estrutura e erosão laminar	Aveia-preta e mucuna-preta	Proteger a superfície do solo, aumentar a cobertura vegetal e melhorar a agregação
Solo degradado	Baixa fertilidade e erosão avançada	Consórcio de braquiária com leguminosas	Recuperar a fertilidade, aumentar a matéria orgânica e reduzir perdas de solo

Fonte: elaborado pelo autor com base em Calegari *et al.* (1993), Embrapa (2021), Reichert, Suzuki e Reinert (2007) e Bayer e Mielniczuk (2017).

A escolha das espécies mais adequadas para cada situação deve considerar fatores como clima, tipo de solo e sistema de cultivo. Algumas espécies apresentam melhor desempenho em determinadas condições climáticas, sendo necessário um planejamento adequado para a escolha da cobertura vegetal mais eficiente. O milho, por exemplo, é altamente adaptado a regiões de clima quente e seco, tornando-se uma excelente opção para áreas do Cerrado brasileiro, onde a escassez hídrica pode ser um desafio. Já a aveia-preta (*Avena strigosa*) é mais indicada para regiões de clima temperado, pois seu ciclo se ajusta melhor às temperaturas amenas e à umidade típica dessas áreas.

Esse tipo de escolha cuidadosa permite ao produtor explorar ao máximo o potencial das plantas de cobertura, melhorando a eficiência do sistema como um todo. Com isso, o planejamento agrícola deixa de ser apenas uma atividade de rotina e passa a ser uma estratégia de longo prazo, essencial para o sucesso da lavoura.

O tipo de solo também influencia a escolha das plantas de cobertura. Solos

arenosos, com baixa retenção de umidade, beneficiam-se de espécies que promovem maior acúmulo de matéria orgânica, enquanto solos compactados requerem plantas com sistema radicular profundo, como o nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*), utilizado para a descompactação do solo e melhoria da infiltração de água. Segundo estudo de Soratto *et al.* (2022), a bio diversificação com uso de plantas de cobertura melhora a saúde do solo e aumenta a resiliência dos sistemas agrícolas.

A adequação da planta ao tipo de solo é um fator-chave para alcançar bons resultados. Por exemplo, em áreas com solos pobres em nutrientes, a inclusão de leguminosas como a mucuna-preta pode ajudar na recuperação da fertilidade, enquanto gramíneas como o capim-pé-de-galinha auxiliam na cobertura rápida e na proteção contra erosão. Esse manejo inteligente promove ganhos não apenas imediatos, mas também a longo prazo.

Pesquisadores e agricultores têm buscado continuamente aprimorar o uso das plantas de cobertura, equilibrando benefícios produtivos, econômicos e ambientais. A tendência atual aponta para a adoção de sistemas diversificados, com maior integração entre diferentes espécies, visando maximizar os benefícios agrônômicos e aumentar a resiliência dos sistemas produtivos frente às mudanças climáticas e aos desafios da agricultura sustentável.

Além disso, há um crescente interesse por parte dos produtores em aprender sobre os efeitos das plantas de cobertura no controle biológico de pragas, na redução da infestação de plantas daninhas e na recuperação de áreas degradadas. Esse conhecimento, muitas vezes construído com base na experiência prática, vem sendo cada vez mais valorizado e complementado pelas descobertas científicas.

Com base nos avanços científicos e na experiência prática dos produtores, espera-se que o uso dessas plantas continue crescendo e consolidando-se como um dos pilares fundamentais da agricultura moderna. A adoção dessas práticas não apenas melhora a qualidade do solo e a produtividade das lavouras, mas também contribui para a conservação dos recursos naturais, tornando a produção agrícola mais eficiente e ambientalmente responsável. Conforme destaca Soratto *et al.* (2022), a bio diversificação com plantas de cobertura é uma estratégia promissora para sistemas agrícolas tropicais sustentáveis.

Dessa forma, as plantas de cobertura deixam de ser vistas apenas como uma técnica complementar e passam a ocupar um lugar central no planejamento agrícola. Ao aliar produtividade e preservação ambiental, elas representam uma ponte entre

o presente e o futuro da agricultura, promovendo um modelo mais justo, equilibrado e adaptado aos desafios do século XXI.

2.6 COMPACTAÇÃO DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

A compactação do solo constitui uma das principais formas de degradação física em sistemas agrícolas, sendo caracterizada pelo aumento da densidade do solo, redução do volume de poros e elevação da resistência mecânica à penetração das raízes. Esse processo compromete a estrutura do solo e interfere diretamente na circulação de água e ar, no desenvolvimento radicular e na produtividade das culturas. Em sistemas agrícolas intensivos, a compactação torna-se ainda mais preocupante, pois limita o funcionamento adequado do solo como ambiente físico, químico e biológico para o crescimento vegetal (Richart *et al.*, 2005).

Nos sistemas de produção agrícola, uma das principais causas da compactação está relacionada ao tráfego de máquinas e implementos, especialmente quando as operações são realizadas em condições inadequadas de umidade. A pressão exercida por tratores, colhedoras e pulverizadores pode provocar o rearranjo das partículas do solo, diminuindo a macroporosidade e formando camadas compactadas em diferentes profundidades. Esse problema é recorrente em áreas mecanizadas, nas quais o número de passadas e a carga aplicada sobre o solo influenciam diretamente a intensidade da compactação (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

A umidade do solo é um fator determinante para a ocorrência e a intensidade da compactação. Quando o solo se encontra com teor de água elevado, sua resistência à deformação diminui, tornando-o mais suscetível à pressão exercida pelas máquinas agrícolas. Nessas condições, as partículas se aproximam com maior facilidade, reduzindo o espaço poroso e comprometendo a estrutura física do solo. Por isso, o planejamento das operações agrícolas deve considerar não apenas o calendário produtivo, mas também as condições de umidade no momento do tráfego de máquinas (Richart *et al.*, 2005).

Em áreas conduzidas sob sistema plantio direto, a compactação também pode ocorrer, principalmente nos primeiros centímetros do solo, em razão do tráfego repetido de máquinas nas operações de semeadura, pulverização e colheita. Embora o plantio direto contribua para a manutenção da palhada e redução do revolvimento,

seu manejo inadequado, associado à ausência de rotação de culturas e à baixa produção de resíduos vegetais, pode favorecer o aparecimento de camadas compactadas. Assim, a eficiência do sistema depende da associação entre cobertura permanente, diversificação de culturas e controle do tráfego agrícola (Embrapa, 2024).

A compactação do solo altera propriedades físicas fundamentais, como densidade, porosidade, macroporosidade, infiltração de água e resistência à penetração. A redução dos macroporos prejudica a drenagem e a aeração, enquanto o aumento da resistência mecânica dificulta o crescimento das raízes. Como resultado, as plantas passam a explorar menor volume de solo, reduzindo a absorção de água e nutrientes, especialmente em períodos de estiagem. Esses efeitos demonstram que a compactação não compromete apenas a estrutura física do solo, mas também o desempenho fisiológico das culturas agrícolas (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

Outro efeito importante da compactação é a redução da infiltração de água no solo. Quando a porosidade é diminuída, a água da chuva tem maior dificuldade para penetrar no perfil, favorecendo o escoamento superficial e aumentando o risco de erosão. A Embrapa destaca que a cobertura do solo com plantas vivas e palhada influencia diretamente a taxa de infiltração, pois protege a superfície contra o impacto das gotas de chuva, aumenta a rugosidade e contribui para dissipar a energia da água sobre o solo. Dessa forma, a ausência de cobertura vegetal pode agravar os efeitos da compactação e intensificar processos erosivos (Embrapa, 2024).

A compactação também interfere no crescimento radicular das culturas. Em solos compactados, as raízes encontram maior resistência mecânica para se aprofundar, podendo se concentrar nas camadas superficiais. Essa limitação reduz o volume de solo explorado, prejudicando o acesso à água e aos nutrientes disponíveis em profundidade. Em estudos sobre compactação, autores brasileiros destacam que os efeitos sobre o crescimento radicular variam conforme o tipo de solo, a cultura utilizada e o grau de compactação, sendo necessário avaliar limites críticos que possam restringir o desenvolvimento das plantas (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

Além dos efeitos físicos, a compactação afeta a atividade biológica do solo, pois a redução da aeração e da infiltração de água altera as condições necessárias para o desenvolvimento de microrganismos e organismos edáficos. A menor atividade biológica pode comprometer a decomposição da matéria orgânica, a formação de agregados e a ciclagem de nutrientes. Dessa forma, a compactação deve ser

compreendida como um problema integrado, que afeta simultaneamente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Richart *et al.*, 2005).

A matéria orgânica desempenha papel fundamental na redução da suscetibilidade do solo à compactação, pois contribui para a formação e estabilidade dos agregados, melhora a retenção de água e favorece a atividade biológica. Sistemas de manejo que promovem o aporte contínuo de resíduos vegetais, como o plantio direto bem conduzido e o uso de plantas de cobertura, tendem a melhorar a estrutura do solo ao longo do tempo. Estudos nacionais sobre agregação do solo indicam que sistemas com maior aporte de carbono e resíduos vegetais favorecem a estabilidade dos agregados e a qualidade estrutural do solo (Loss *et al.*, 2011).

Nesse contexto, práticas conservacionistas como rotação de culturas, manutenção da palhada e uso de plantas de cobertura são fundamentais para prevenir ou reduzir os efeitos da compactação. A Embrapa destaca que a rotação de culturas é indispensável para o bom funcionamento do sistema plantio direto, pois permite maior produção de palhada, diversificação de raízes e melhor proteção da superfície do solo. Essas práticas contribuem para reduzir o impacto do tráfego agrícola, melhorar a infiltração de água e favorecer a recuperação gradual da estrutura física do solo (Embrapa, 2024).

As plantas de cobertura apresentam papel importante na mitigação da compactação, pois atuam tanto pela proteção superficial quanto pelo crescimento radicular. Espécies como braquiária, milheto e nabo-forrageiro são frequentemente utilizadas em sistemas agrícolas brasileiros por sua capacidade de produção de biomassa, formação de palhada e exploração de diferentes camadas do solo. Segundo levantamento recente da Embrapa, essas espécies estão entre as mais utilizadas por produtores rurais, evidenciando sua relevância prática em sistemas de manejo conservacionista (Embrapa, 2025).

Dessa forma, a compactação do solo em sistemas agrícolas deve ser compreendida como resultado da interação entre tráfego de máquinas, umidade inadequada, baixa cobertura vegetal, ausência de rotação de culturas e redução da matéria orgânica. Seus efeitos comprometem a porosidade, a infiltração de água, o crescimento radicular, a atividade biológica e a produtividade agrícola. Por isso, a adoção de práticas conservacionistas, especialmente o uso de plantas de cobertura associado ao plantio direto e à rotação de culturas, constitui uma estratégia fundamental para preservar a qualidade física do solo e promover maior

sustentabilidade nos sistemas produtivos (Richart *et al.*, 2005; Reichert; Suzuki; Reinert, 2007; Embrapa, 2024).

2.7 EFEITOS DA COMPACTAÇÃO NA POROSIDADE, INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E DESENVOLVIMENTO RADICULAR

A compactação do solo interfere diretamente nos atributos físicos responsáveis pelo funcionamento adequado do ambiente edáfico, especialmente a porosidade, a infiltração de água e o crescimento radicular. Quando o solo sofre pressão mecânica, ocorre rearranjo das partículas, aumento da densidade e redução do volume de poros, principalmente dos macroporos, que são essenciais para a circulação de ar e água. Dessa forma, a compactação compromete o equilíbrio físico do solo e limita sua capacidade de sustentar o desenvolvimento das culturas agrícolas (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

A porosidade do solo é formada por espaços entre partículas e agregados, sendo responsável pela movimentação de água, gases e raízes no perfil do solo. Em solos compactados, há redução da porosidade total e, sobretudo, da macroporosidade, que exerce papel fundamental na drenagem e na aeração. A diminuição dos poros maiores provoca maior retenção de água em poros pequenos, mas reduz a disponibilidade de oxigênio e dificulta o fluxo de água em profundidade, prejudicando o desenvolvimento das plantas (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

A redução da macroporosidade está diretamente relacionada à diminuição da taxa de infiltração de água no solo. A Embrapa destaca que a macroporosidade é responsável pela entrada e movimentação da água no perfil, de modo que solos com camadas compactadas apresentam baixa infiltração e maior risco de acúmulo de água na superfície. Esse acúmulo favorece o escoamento superficial e pode intensificar processos erosivos, especialmente em áreas sem cobertura vegetal adequada (Kochhann; Denardin; Berton, 2000).

A infiltração de água é um dos processos mais afetados pela compactação, pois depende da continuidade dos poros e da estabilidade estrutural do solo. Quando a compactação rompe essa continuidade, a água da chuva encontra maior dificuldade para penetrar no perfil, reduzindo o armazenamento hídrico disponível às plantas. Em sistemas agrícolas, essa limitação pode comprometer o desempenho das culturas em períodos de estiagem, uma vez que as raízes passam a explorar um volume menor

de solo e encontram menor disponibilidade de água em profundidade (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

A cobertura do solo exerce influência importante sobre a infiltração de água, pois protege a superfície contra o impacto das gotas de chuva, reduz a desagregação dos agregados e diminui a formação de selamento superficial. Segundo a Embrapa, a presença de plantas vivas e palhada aumenta a rugosidade da superfície e favorece a entrada de água no solo, reduzindo perdas por escoamento. Dessa forma, em áreas compactadas, a manutenção de cobertura vegetal pode contribuir para minimizar os efeitos da degradação física e melhorar o aproveitamento da água pelas culturas (Embrapa, 2024).

Além de afetar a infiltração, a compactação aumenta a resistência mecânica do solo à penetração das raízes. Em condições de alta resistência, as raízes encontram dificuldade para se alongar e explorar camadas mais profundas, podendo apresentar crescimento superficial, engrossamento e alterações morfológicas. Estudos brasileiros demonstram que a compactação interfere no crescimento radicular e na produtividade da cultura do milho, evidenciando que alterações físicas do solo podem comprometer tanto a arquitetura das raízes quanto o desempenho produtivo das plantas (Freddi *et al.*, 2007).

O desenvolvimento radicular é essencial para a absorção de água e nutrientes, especialmente em sistemas agrícolas sujeitos a períodos de déficit hídrico. Quando o solo apresenta camadas compactadas, as raízes tendem a se concentrar nas camadas superficiais, reduzindo o volume de solo explorado. Essa limitação compromete a capacidade das plantas de acessar água em profundidade e pode aumentar sua sensibilidade à seca, resultando em menor crescimento vegetativo e redução do potencial produtivo (FREDDI *et al.*, 2007).

A resistência do solo à penetração é um dos indicadores físicos mais utilizados para avaliar a presença de camadas compactadas e seus possíveis efeitos sobre as culturas. Em estudo realizado em Argissolo Vermelho sob diferentes manejos, Lima *et al.* observaram relação entre resistência à penetração e produtividade de culturas, demonstrando que valores elevados podem restringir o desenvolvimento das plantas. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento da compactação em áreas agrícolas, principalmente em sistemas com tráfego frequente de máquinas (Lima *et al.*, 2010).

Os efeitos da compactação sobre as plantas variam conforme o tipo de solo, o

teor de água, a cultura implantada e o grau de compactação. Solos argilosos, por exemplo, podem apresentar maior suscetibilidade à formação de camadas compactadas quando manejados em condições inadequadas de umidade. No entanto, a resposta das culturas não depende apenas da densidade do solo, mas também da interação entre porosidade, resistência à penetração, disponibilidade de água e aeração. Por isso, a avaliação da qualidade física do solo deve considerar um conjunto de indicadores, e não apenas um atributo isolado (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

A compactação também interfere na aeração do solo, pois a redução dos macroporos diminui os espaços disponíveis para a difusão de oxigênio. A baixa disponibilidade de oxigênio pode comprometer a respiração das raízes e a atividade de microrganismos aeróbicos, afetando processos essenciais como decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes. Assim, a compactação apresenta efeitos integrados, pois altera simultaneamente a circulação de água, aeração, atividade biológica e crescimento vegetal (Richart *et al.*, 2005).

Em sistemas agrícolas conservacionistas, práticas como rotação de culturas, plantio direto bem conduzido e uso de plantas de cobertura podem contribuir para melhorar a porosidade e a infiltração de água ao longo do tempo. A presença de diferentes sistemas radiculares favorece a formação de canais naturais e a estabilização de agregados, enquanto a palhada protege a superfície e reduz o impacto direto das chuvas. Dessa forma, o manejo conservacionista pode atenuar os efeitos da compactação e favorecer a recuperação gradual da estrutura física do solo (Embrapa, 2024).

As plantas de cobertura são importantes nesse processo porque atuam tanto na superfície quanto em profundidade. Na superfície, protegem o solo contra o impacto das gotas de chuva e reduzem a formação de crostas; em profundidade, suas raízes exploram diferentes camadas e podem formar canais que permanecem após a decomposição. Esses canais contribuem para a infiltração de água e para o crescimento das raízes das culturas subsequentes, funcionando como um mecanismo biológico de melhoria da estrutura física do solo (Kochhann; Denardin; Berton, 2000; Embrapa, 2024).

Dessa forma, os efeitos da compactação sobre porosidade, infiltração de água e desenvolvimento radicular estão interligados e comprometem diretamente a produtividade agrícola. A redução dos macroporos limita a entrada de água e ar, o aumento da resistência à penetração restringe o crescimento das raízes e a menor

exploração do perfil reduz o acesso das plantas à água e aos nutrientes. Por isso, a prevenção e a mitigação da compactação exigem práticas de manejo que favoreçam a cobertura permanente, a diversificação de raízes e a manutenção da qualidade física do solo (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007; Freddi *et al.*, 2007; Lima *et al.*, 2010).

2.8 SISTEMA RADICULAR, BIOPOROS E REESTRUTURAÇÃO FÍSICA DO SOLO

O sistema radicular das plantas exerce papel fundamental na melhoria da qualidade física do solo, especialmente em áreas submetidas à compactação. As raízes atuam como agentes biológicos capazes de explorar diferentes camadas do perfil, exercer pressão sobre partículas e agregados e contribuir para a formação de canais naturais. Em solos compactados, o crescimento radicular pode ser limitado pela resistência mecânica, mas determinadas espécies utilizadas como plantas de cobertura apresentam maior capacidade de adaptação e exploração de camadas adensadas, favorecendo a recuperação gradual da estrutura do solo (Foloni; Lima; Büll, 2006).

As raízes das plantas de cobertura podem atuar na chamada descompactação biológica, processo no qual o crescimento radicular contribui para a abertura de espaços no solo sem necessidade de revolvimento mecânico intenso. Após a morte e decomposição das raízes, permanecem canais no perfil do solo, conhecidos como bioporos, que favorecem a infiltração de água, a difusão de gases e o crescimento das raízes das culturas subsequentes. Esse mecanismo é importante em sistemas conservacionistas, pois permite melhorar a estrutura física do solo de forma gradual e menos agressiva ao ambiente (Foloni; Lima; Büll, 2006).

Os bioporos são estruturas formadas pela atividade de raízes e organismos do solo, funcionando como caminhos preferenciais para a movimentação de água, ar e raízes. Em áreas compactadas, esses canais podem representar uma alternativa para reduzir os efeitos da resistência mecânica, pois permitem que as culturas seguintes explorem camadas mais profundas do solo. Dessa forma, a presença de bioporos contribui para maior continuidade dos poros, melhor infiltração de água e ampliação do volume de solo explorado pelo sistema radicular (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

Em estudo conduzido com soja e plantas de cobertura em camadas compactadas de solo, Foloni, Lima e Büll (2006) observaram que o impedimento físico em subsuperfície alterou a distribuição do sistema radicular ao longo do perfil. Os

autores verificaram que a compactação não reduziu a produção total de raízes da maioria das espécies avaliadas, mas modificou sua distribuição, evidenciando respostas diferentes entre espécies. No mesmo estudo, a mucuna-preta apresentou maior tolerância à compactação, enquanto a soja foi mais sensível, indicando que algumas plantas de cobertura podem ser mais adequadas para sistemas de manejo em solos compactados.

A crotalária-júncea também apresentou destaque no estudo de Foloni, Lima e Büll (2006), pois seu sistema radicular demonstrou potencial de formação de bioporos compatível ao da mucuna-preta. Esse resultado evidencia que espécies com raízes vigorosas podem contribuir para a reorganização física do solo, mesmo quando submetidas a condições de maior impedimento mecânico. Assim, o uso dessas espécies em rotação de culturas pode favorecer a criação de canais naturais no solo, auxiliando a infiltração de água e o crescimento radicular das culturas comerciais subsequentes (Foloni; Lima; Büll, 2006).

Além das leguminosas, outras espécies de plantas de cobertura apresentam características radiculares importantes para a melhoria da estrutura do solo. O nabo-forrageiro, por exemplo, é frequentemente citado em sistemas de plantio direto devido à sua raiz pivotante profunda, crescimento inicial rápido e capacidade de explorar camadas mais densas. Segundo a Embrapa, as raízes do nabo-forrageiro influenciam as condições físicas do solo, atuando especialmente na descompactação e tornando o solo mais permeável e solto (Embrapa, 2021).

As gramíneas utilizadas como plantas de cobertura também contribuem para a reestruturação física do solo, principalmente por apresentarem sistema radicular fasciculado e elevada produção de biomassa. Espécies como braquiária, milheto e aveia-preta produzem grande quantidade de raízes finas, que favorecem a agregação das partículas do solo e a formação de uma rede porosa mais estável. Além disso, a decomposição dessas raízes adiciona matéria orgânica ao perfil, contribuindo para maior estabilidade dos agregados e melhoria das condições físicas do solo (Calegari *et al.*, 1993).

O efeito das raízes na estruturação do solo está diretamente relacionado à sua capacidade de crescimento em profundidade, produção de biomassa radicular e permanência dos canais após a decomposição. Raízes mais espessas, como as de algumas leguminosas e brassicáceas, podem exercer maior pressão sobre camadas compactadas, enquanto raízes finas e abundantes, comuns em gramíneas,

contribuem para a agregação e para o aumento da porosidade. Assim, diferentes grupos de plantas de cobertura podem exercer funções complementares na recuperação física do solo (Foloni; Lima; Büll, 2006).

A utilização de plantas de cobertura com sistemas radiculares diversificados é especialmente importante em áreas sob plantio direto, nas quais o revolvimento do solo é reduzido. Nesses sistemas, a melhoria da estrutura física depende da ação combinada das raízes, da palhada e da atividade biológica. A Embrapa destaca que a rotação de culturas e a manutenção permanente de cobertura vegetal são fundamentais para o bom funcionamento do sistema plantio direto, pois favorecem a produção de resíduos, a proteção da superfície e a melhoria da qualidade física do solo (Embrapa, 2024).

A formação de bioporos também favorece o desenvolvimento das culturas subsequentes, pois os canais deixados pelas raízes das plantas de cobertura podem ser reutilizados por novas raízes. Esse processo facilita o aprofundamento radicular, aumenta o acesso à água e aos nutrientes e melhora a tolerância das plantas a períodos de déficit hídrico. Em solos compactados, essa continuidade de poros pode ser decisiva para permitir maior exploração do perfil e reduzir os efeitos negativos da resistência mecânica (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

A reestruturação física do solo promovida pelas raízes não ocorre de maneira imediata, mas resulta do uso contínuo de práticas conservacionistas. O cultivo sucessivo de plantas de cobertura, associado à rotação de culturas e à manutenção da palhada, favorece o aumento gradual da matéria orgânica, a estabilidade de agregados e a atividade biológica. Dessa forma, a melhoria da estrutura do solo depende de planejamento de médio e longo prazo, sendo mais eficiente quando integrada a sistemas de manejo conservacionista (Calegari *et al.*, 1993).

A ação das raízes também está relacionada à atividade dos organismos do solo, como microrganismos, fungos e macrofauna edáfica. A presença de resíduos vegetais e raízes em decomposição fornece alimento para esses organismos, que participam da formação de agregados e da abertura de canais no solo. Assim, a reestruturação física não depende apenas da penetração das raízes, mas também da interação entre sistema radicular, matéria orgânica e atividade biológica, reforçando a importância das plantas de cobertura na recuperação de solos compactados (RICHART *et al.*, 2005).

Embora as plantas de cobertura apresentem potencial para reduzir os efeitos

da compactação, sua eficiência depende da espécie utilizada, do nível de compactação, do tipo de solo e das condições climáticas. Em compactações muito severas, o crescimento radicular pode ser limitado, reduzindo a capacidade de formação de bioporos. Por isso, a escolha das espécies deve considerar a profundidade da camada compactada, a produção de biomassa e o objetivo do manejo, podendo ser necessário associar práticas biológicas e mecânicas em determinadas situações (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

Dessa forma, o sistema radicular das plantas de cobertura representa um dos principais mecanismos de melhoria da qualidade física do solo em áreas compactadas. A formação de bioporos, o aumento da porosidade, a agregação das partículas e a maior infiltração de água demonstram que as raízes atuam como agentes naturais de reestruturação. Assim, o uso planejado de espécies como mucuna-preta, crotalária-júncea, nabo-forrageiro, braquiária, milheto e aveia-preta pode contribuir para a recuperação gradual da estrutura do solo e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Foloni; Lima; Büll, 2006; Embrapa, 2021; Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

2.9 MATÉRIA ORGÂNICA, ATIVIDADE BIOLÓGICA E CICLAGEM DE NUTRIENTES EM SOLOS COMPACTADOS

A matéria orgânica é um dos principais componentes responsáveis pela manutenção da qualidade física, química e biológica do solo, exercendo influência direta sobre a agregação, a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a atividade dos organismos edáficos. Em solos compactados, sua importância torna-se ainda maior, pois o aumento do teor de matéria orgânica contribui para melhorar a estrutura, reduzir a densidade aparente e favorecer a formação de poros. Dessa forma, práticas agrícolas que aumentam o aporte de resíduos vegetais são fundamentais para a recuperação gradual da qualidade física do solo (Loss *et al.*, 2011).

Em sistemas agrícolas intensivos, a redução da matéria orgânica está frequentemente associada ao revolvimento excessivo, à baixa produção de palhada e à ausência de rotação de culturas. Esses fatores tornam o solo mais suscetível à compactação, pois diminuem a estabilidade dos agregados e reduzem a proteção da superfície contra o impacto das chuvas e o tráfego de máquinas. Nesse sentido,

sistemas conservacionistas, como o plantio direto associado ao uso de plantas de cobertura, favorecem o acúmulo de resíduos vegetais e contribuem para a manutenção da estrutura do solo (Bayer; Mielniczuk, 2017).

A matéria orgânica atua como agente de ligação entre partículas minerais, favorecendo a formação e a estabilidade dos agregados do solo. Agregados mais estáveis resistem melhor à desagregação provocada pela água e pela pressão mecânica, o que reduz a suscetibilidade à compactação e melhora a continuidade dos poros. Em estudo conduzido em Latossolo Vermelho sob plantio direto com integração lavoura-pecuária, Loss *et al.* (2011) observaram que o sistema com braquiária promoveu maiores índices de agregação, maiores teores de matéria orgânica leve e maiores teores de carbono e nitrogênio nos agregados do solo.

O acúmulo de carbono orgânico no solo está diretamente relacionado ao aporte contínuo de resíduos vegetais provenientes da palhada e das raízes. Em sistemas com plantas de cobertura, esses resíduos permanecem na superfície e no perfil do solo, sendo decompostos gradualmente pela atividade de microrganismos. Esse processo contribui para a formação de matéria orgânica mais estável e para a melhoria das propriedades físicas do solo, especialmente em áreas compactadas, nas quais a estabilidade estrutural é essencial para restabelecer a porosidade e a infiltração de água (Loss *et al.*, 2011).

A atividade biológica do solo também é influenciada pela presença de matéria orgânica, pois os resíduos vegetais fornecem energia e nutrientes para microrganismos, fungos, bactérias e organismos da macrofauna. Esses organismos participam da decomposição da palhada, da ciclagem de nutrientes e da formação de agregados estáveis. Em solos compactados, a atividade biológica pode ser prejudicada pela redução da aeração e da infiltração de água; por isso, o aumento da matéria orgânica contribui para criar condições mais favoráveis ao funcionamento biológico do solo (Richart *et al.*, 2005).

A presença de raízes vivas e resíduos em decomposição favorece a atividade microbiana e a formação de canais naturais no solo. As raízes liberam exsudatos que servem como fonte de carbono para microrganismos, enquanto sua decomposição posterior contribui para a abertura de poros e para a estabilização dos agregados. Assim, as plantas de cobertura atuam não apenas pela produção de palhada, mas também pela intensificação da atividade biológica no perfil do solo, elemento essencial para a reestruturação física de solos compactados (Calegari *et al.*, 1993).

A ciclagem de nutrientes é outro processo fundamental associado ao uso de plantas de cobertura em solos compactados. Essas plantas absorvem nutrientes de diferentes camadas do solo durante seu crescimento e, após a decomposição da biomassa, devolvem parte desses elementos ao sistema. Esse processo reduz perdas por lixiviação, melhora a disponibilidade de nutrientes para as culturas subsequentes e contribui para maior eficiência no uso de fertilizantes. Em estudo da Embrapa, plantas de cobertura em sistemas com arroz de terras altas e soja demonstraram contribuição para a produção de palhada e para a ciclagem de nutrientes em sistemas agrícolas (Pacheco *et al.*, 2011).

Espécies de plantas de cobertura apresentam diferenças quanto à quantidade de biomassa produzida, velocidade de decomposição e capacidade de acumular nutrientes. Gramíneas, como braquiária, milheto e aveia, geralmente produzem maior quantidade de palhada e apresentam decomposição mais lenta, favorecendo a cobertura prolongada do solo. Leguminosas, como crotalária e mucuna, possuem menor relação carbono/nitrogênio e tendem a liberar nutrientes mais rapidamente, além de contribuírem para a fixação biológica de nitrogênio. A escolha da espécie deve considerar o objetivo do manejo e as condições do solo (Calegari *et al.*, 1993).

Em solos compactados, a ciclagem de nutrientes está diretamente relacionada à melhoria da estrutura física. Quando a compactação limita o crescimento das raízes, a absorção de nutrientes em profundidade também é prejudicada. O uso de plantas de cobertura com sistemas radiculares profundos permite explorar camadas inferiores, reciclar nutrientes e trazê-los para camadas mais superficiais por meio da decomposição da biomassa. Esse mecanismo é importante para aumentar a disponibilidade de nutrientes e favorecer o desenvolvimento das culturas subsequentes (Pacheco *et al.*, 2011).

A palhada mantida sobre a superfície do solo desempenha papel essencial na conservação da umidade, na redução da amplitude térmica e na proteção contra o impacto das gotas de chuva. Essas condições favorecem a atividade biológica e a decomposição gradual dos resíduos, contribuindo para a liberação de nutrientes e para a formação de matéria orgânica. A Embrapa destaca que o manejo da matéria orgânica está diretamente relacionado à qualidade do sistema solo, pois raízes, microrganismos e resíduos vegetais participam da estruturação, estabilização de agregados e reciclagem de nutrientes (Embrapa, 2017).

A integração entre matéria orgânica e atividade biológica contribui para

aumentar a resiliência do solo frente aos efeitos da compactação. A presença de agregados estáveis, maior porosidade e maior atividade microbiana favorece a recuperação gradual da estrutura física, reduzindo a resistência à penetração e melhorando a infiltração de água. Sistemas conservacionistas com maior aporte de resíduos vegetais tendem a apresentar melhores condições físicas e biológicas em comparação a sistemas com baixa cobertura e maior revolvimento do solo (Loss *et al.*, 2011).

Além dos benefícios físicos, a matéria orgânica contribui para a fertilidade química do solo, pois participa da retenção de nutrientes, aumenta a capacidade de troca de cátions e favorece a liberação gradual de elementos essenciais às plantas. Em solos compactados, esse efeito é importante porque a restrição ao crescimento radicular pode limitar o acesso das culturas aos nutrientes disponíveis. Assim, o aumento da matéria orgânica e a ciclagem promovida pelas plantas de cobertura podem compensar parcialmente as limitações impostas pela compactação, melhorando o ambiente de crescimento das plantas (Bayer; Mielniczuk, 2017).

A atividade da macrofauna edáfica, como minhocas, insetos e outros organismos, também é favorecida pela presença de cobertura vegetal e matéria orgânica. Esses organismos contribuem para a fragmentação dos resíduos, abertura de galerias e mistura de materiais orgânicos e minerais, favorecendo a formação de poros e a melhoria da estrutura do solo. Em solos compactados, a recuperação da macrofauna depende da adoção de práticas que reduzam o revolvimento, mantenham palhada e favoreçam maior aporte de carbono ao sistema (Richart *et al.*, 2005).

Apesar dos benefícios, a recuperação de solos compactados por meio da matéria orgânica e da atividade biológica é um processo gradual, que depende da continuidade do manejo conservacionista. O uso isolado de plantas de cobertura por apenas uma safra pode não ser suficiente para reverter problemas físicos severos. Por isso, é necessário integrar rotação de culturas, plantio direto, diversificação de espécies e manutenção permanente da cobertura do solo para que ocorram melhorias consistentes na estrutura, na porosidade e na fertilidade do solo (Calegari *et al.*, 1993).

Dessa forma, a matéria orgânica, a atividade biológica e a ciclagem de nutrientes constituem elementos centrais na recuperação de solos compactados. As plantas de cobertura contribuem para esse processo ao fornecerem palhada, raízes, exsudatos e biomassa, que alimentam os organismos do solo, favorecem a formação de agregados e aumentam a disponibilidade de nutrientes. Assim, a melhoria da

qualidade física do solo depende da integração entre processos físicos, químicos e biológicos, reforçando a importância do manejo conservacionista em sistemas agrícolas sustentáveis (Loss *et al.*, 2011; Pacheco *et al.*, 2011; Embrapa, 2017).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada, de caráter exploratório e analítico, com o objetivo de reunir, organizar e interpretar evidências científicas sobre o uso de plantas de cobertura na redução da compactação do solo em sistemas agrícolas. A escolha por esse tipo de abordagem justifica-se pela necessidade de compreender, a partir de estudos já publicados, os principais efeitos dessas plantas sobre atributos físicos do solo, como porosidade, infiltração de água, resistência à penetração e desenvolvimento radicular. Conforme Gil (2002), a pesquisa bibliográfica permite analisar materiais já elaborados, especialmente livros e artigos científicos, sendo adequada para a construção de fundamentação teórica e sistematização do conhecimento disponível sobre determinado tema.

A revisão foi estruturada em etapas sucessivas de identificação, seleção, leitura, categorização e síntese das publicações. Esse procedimento permitiu organizar as informações de maneira mais objetiva e reduzir a seleção aleatória de fontes, conferindo maior transparência ao levantamento bibliográfico. Segundo Lakatos e Marconi (2017), a pesquisa bibliográfica não se limita à repetição do que já foi publicado, mas possibilita examinar o tema sob novo enfoque, favorecendo conclusões a partir da análise crítica das contribuições existentes.

Para a identificação dos estudos, foram consultadas bases de dados e repositórios científicos de ampla utilização na área agrônômica, incluindo SciELO, Google Scholar, Portal de Periódicos da CAPES, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), repositórios institucionais de universidades brasileiras e publicações técnicas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Também foram considerados livros técnicos, capítulos de livros, dissertações, teses, artigos científicos e documentos institucionais relacionados à ciência do solo, compactação, plantas de cobertura, sistema plantio direto e manejo conservacionista. A utilização de diferentes fontes permitiu ampliar a abrangência da revisão e contemplar tanto estudos científicos quanto materiais técnicos aplicados à realidade agrícola brasileira.

Os descritores utilizados nas buscas foram definidos conforme os principais

eixos do trabalho. Foram empregados os termos: “compactação do solo”, “plantas de cobertura”, “descompactação biológica”, “bioporos”, “porosidade do solo”, “infiltração de água no solo”, “sistema radicular”, “matéria orgânica do solo”, “ciclagem de nutrientes”, “plantio direto” e “manejo conservacionista”.

O recorte temporal adotado priorizou publicações realizadas entre 2005 e 2026, considerando a necessidade de utilizar estudos recentes sem desconsiderar trabalhos nacionais clássicos e amplamente citados na área de ciência do solo. Foram incluídas publicações em língua portuguesa, desenvolvidas no Brasil ou voltadas às condições de solos e sistemas agrícolas brasileiros. A escolha por priorizar referências nacionais justifica-se pela importância de analisar estudos compatíveis com as condições edafoclimáticas, os sistemas de manejo e as práticas agrícolas predominantes no país.

Os critérios de inclusão contemplaram estudos que abordassem diretamente a compactação do solo, os efeitos das plantas de cobertura sobre a qualidade física do solo, a formação de bioporos, o desenvolvimento radicular, a matéria orgânica, a atividade biológica, a ciclagem de nutrientes e a conservação do solo em sistemas agrícolas. Também foram incluídos trabalhos que analisassem espécies utilizadas como plantas de cobertura, como braquiária, milheto, aveia-preta, crotalária, mucuna-preta e nabo-forrageiro, desde que apresentassem relação com melhoria estrutural do solo, infiltração de água, produção de biomassa ou redução da degradação física.

Foram excluídos materiais sem identificação clara de autoria, textos opinativos sem base científica, resumos simples de eventos sem acesso ao trabalho completo, publicações duplicadas, conteúdos sem relação direta com o tema e estudos que tratavam de plantas de cobertura apenas sob enfoque comercial ou produtivo, sem discussão sobre atributos do solo. Também foram desconsideradas fontes que não apresentavam informações suficientes para contribuir com a análise dos mecanismos de atuação das plantas de cobertura na redução da compactação e na melhoria da estrutura física do solo.

Após a identificação inicial das publicações, foi realizada a triagem dos materiais por meio da leitura dos títulos, resumos e palavras-chave. Os estudos considerados aderentes ao tema passaram por leitura integral, sendo analisados quanto ao objetivo, tipo de estudo, espécies avaliadas, atributos do solo investigados, principais resultados e contribuições para a compreensão da compactação. Essa etapa possibilitou selecionar as publicações mais relevantes para compor o referencial

teórico e embasar a discussão dos resultados da revisão.

As informações extraídas dos estudos selecionados foram organizadas em categorias temáticas, de acordo com os objetivos do trabalho. As categorias utilizadas foram: causas e consequências da compactação do solo; efeitos da compactação sobre porosidade, infiltração de água e crescimento radicular; plantas de cobertura como estratégia de mitigação da compactação; sistema radicular, bioporos e reestruturação física do solo; matéria orgânica, atividade biológica e ciclagem de nutrientes. Essa categorização permitiu comparar os achados da literatura e construir uma análise integrada sobre o papel das plantas de cobertura na recuperação da qualidade física do solo.

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, por meio da comparação e interpretação dos resultados apresentados nas publicações selecionadas. Não foram realizados experimentos de campo ou análises laboratoriais próprias, uma vez que o estudo se caracteriza como revisão bibliográfica. Assim, os resultados foram construídos a partir da sistematização das evidências disponíveis na literatura, buscando identificar convergências, limitações e contribuições práticas relacionadas ao uso de plantas de cobertura em solos compactados.

A síntese dos resultados foi organizada de modo a relacionar os efeitos das plantas de cobertura com os principais atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Foram observadas, especialmente, as contribuições dessas plantas para a formação de palhada, aumento da matéria orgânica, formação de canais radiculares, melhoria da porosidade, aumento da infiltração de água, estímulo à atividade biológica e ciclagem de nutrientes. Essa organização permitiu compreender de maneira mais ampla como diferentes espécies podem atuar na mitigação dos efeitos da compactação e na construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Dessa forma, a metodologia adotada possibilitou reunir e interpretar estudos nacionais sobre compactação do solo e plantas de cobertura, permitindo a construção de uma revisão bibliográfica sistematizada e coerente com os objetivos propostos. A partir da análise das publicações selecionadas, buscou-se oferecer uma síntese técnica e científica capaz de contribuir para o entendimento do tema e para a adoção de práticas conservacionistas voltadas à melhoria da qualidade física do solo em sistemas agrícolas brasileiros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS

Os resultados obtidos por meio da revisão bibliográfica sistematizada são apresentados no Quadro 1, contemplando estudos nacionais relacionados à compactação do solo, plantas de cobertura, porosidade, infiltração de água, crescimento radicular, matéria orgânica, atividade biológica e ciclagem de nutrientes. A organização das informações permite visualizar as principais contribuições de cada estudo para a compreensão do papel das plantas de cobertura na melhoria da qualidade física do solo e na redução dos efeitos da compactação.

Quadro 1 - Estudos sobre compactação do solo e plantas de cobertura em sistemas agrícolas

Autor/Ano	Objetivos	Resultados	Conclusão
Richart <i>et al.</i> (2005)	Analisar as causas e os efeitos da compactação do solo em sistemas agrícolas.	A compactação foi associada ao tráfego de máquinas, ao manejo inadequado, ao aumento da densidade do solo, à redução da porosidade e à limitação do crescimento radicular.	A compactação compromete a qualidade física do solo e exige práticas de manejo que reduzam a pressão mecânica e melhorem a estrutura do solo.
Reichert, Suzuki e Reinert (2007)	Discutir a identificação, os efeitos, os limites críticos e as formas de mitigação da compactação do solo.	O estudo demonstrou que a compactação aumenta a resistência à penetração, reduz a macroporosidade, prejudica a infiltração de água e limita o crescimento das raízes.	A avaliação da compactação deve considerar atributos físicos integrados, como densidade, porosidade, resistência à penetração e disponibilidade de água.
Freddi <i>et al.</i> (2007)	Avaliar os efeitos da compactação do solo sobre o crescimento radicular e a produtividade da cultura do milho.	A compactação reduziu o desenvolvimento radicular e interferiu negativamente no desempenho produtivo da cultura.	A limitação física do solo prejudica a produtividade agrícola, reforçando a necessidade de práticas que favoreçam o crescimento das raízes.
Lima <i>et al.</i> (2010)	Relacionar a resistência do solo à penetração com a produtividade de culturas sob diferentes sistemas de manejo.	Valores elevados de resistência à penetração foram associados a limitações no desenvolvimento das culturas.	A resistência à penetração é um indicador importante para diagnosticar camadas compactadas e orientar práticas de manejo.
Kochhann; Denardin; Berton (2000)	Apresentar aspectos técnicos sobre compactação e descompactação de solos agrícolas.	O estudo destacou que a compactação reduz a infiltração de água, prejudica a aeração e limita o desenvolvimento das raízes.	A descompactação deve ser planejada considerando o grau de compactação, o tipo de solo e o sistema de manejo adotado.

Embrapa (2024)	Orientar sobre compactação, infiltração e manejo conservacionista em sistemas agrícolas.	A manutenção da cobertura do solo, a rotação de culturas e o plantio direto bem conduzido foram indicados como práticas importantes para melhorar a estrutura do solo.	A cobertura permanente e a diversificação de culturas são fundamentais para prevenir e reduzir problemas de compactação.
Foloni, Lima e Büll (2006)	Avaliar o crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo.	Mucuna-preta e crotalária-júncea apresentaram maior potencial de crescimento radicular em camadas compactadas, enquanto a soja demonstrou maior sensibilidade.	Algumas plantas de cobertura apresentam potencial para descompactação biológica e formação de canais naturais no solo.
Calegari et al. (1993)	Caracterizar espécies utilizadas como adubos verdes e plantas de cobertura no Sul do Brasil.	O trabalho apresentou espécies com potencial para produção de biomassa, proteção do solo, ciclagem de nutrientes e melhoria da estrutura física.	A escolha adequada das espécies de cobertura contribui para a conservação do solo e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.
Pacheco et al. (2011)	Avaliar a produção de matéria seca e a ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura nas culturas de arroz de terras altas e soja.	As plantas de cobertura contribuíram para a formação de palhada e para a ciclagem de nutrientes, com diferenças entre espécies quanto ao acúmulo de biomassa e nutrientes.	O uso de plantas de cobertura favorece a ciclagem de nutrientes e melhora a eficiência do sistema produtivo em sucessão de culturas.
Loss et al. (2011)	Avaliar agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária.	Sistemas com maior aporte de resíduos vegetais e presença de braquiária apresentaram melhores índices de agregação, carbono e nitrogênio.	A matéria orgânica e os resíduos vegetais favorecem a estabilidade dos agregados e a reestruturação física do solo.
Bayer e Mielniczuk (2017)	Discutir os fundamentos da matéria orgânica do solo em ecossistemas tropicais e subtropicais.	A matéria orgânica foi apontada como componente essencial para a fertilidade, agregação, retenção de água e atividade biológica do solo.	O manejo da matéria orgânica é indispensável para a recuperação da qualidade física, química e biológica do solo.
Salton et al. (2008)	Avaliar atributos físicos e matéria orgânica em sistemas de integração lavoura-pecuária.	Sistemas com maior aporte de resíduos e raízes favoreceram a melhoria da estrutura, da agregação e do teor de matéria orgânica.	A integração de práticas conservacionistas contribui para o aumento da qualidade física do solo.
Hungria et al. (2009)	Analisar a importância da fixação biológica de nitrogênio e da atividade microbiana em sistemas agrícolas.	O estudo destacou o papel dos microrganismos na nutrição vegetal, na fertilidade do solo e na sustentabilidade dos sistemas produtivos.	A atividade biológica é componente essencial para a ciclagem de nutrientes e para a manutenção da saúde do solo.

Hungria e Mendes (2015)	Discutir a contribuição da fixação biológica de nitrogênio e de microrganismos benéficos para a agricultura.	A fixação biológica de nitrogênio foi apresentada como alternativa para reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados.	Leguminosas e microrganismos associados contribuem para a fertilidade do solo e para sistemas agrícolas mais sustentáveis.
Embrapa (2021)	Apresentar características agronômicas e formas de uso do nabo-forrageiro em sistemas agrícolas.	O nabo-forrageiro foi caracterizado pela raiz pivotante profunda, rápida decomposição e capacidade de melhorar a permeabilidade do solo.	O nabo-forrageiro é uma espécie importante para a descompactação biológica e para a formação de canais naturais no solo.
Embrapa (2017)	Discutir a importância do manejo da matéria orgânica para a qualidade do sistema solo.	A publicação destacou que raízes, palhada, microrganismos e matéria orgânica participam da estruturação, infiltração e reciclagem de nutrientes.	O manejo da matéria orgânica é essencial para melhorar a qualidade física, química e biológica do solo.
Sodré Filho et al. (2017)	Avaliar o efeito de plantas de cobertura na supressão de plantas daninhas e na conservação do solo.	A cobertura vegetal reduziu a infestação de plantas daninhas e contribuiu para maior proteção do solo.	As plantas de cobertura podem atuar como estratégia complementar no manejo de plantas daninhas e na conservação do solo.
Castro et al. (2012)	Avaliar efeitos de plantas de cobertura sobre atributos físicos do solo.	As raízes e os resíduos das plantas de cobertura contribuíram para a formação de agregados, aumento da porosidade e melhoria da infiltração.	As plantas de cobertura favorecem a reestruturação física do solo e reduzem os efeitos da degradação.
Torres et al. (2014)	Avaliar produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura.	As espécies avaliadas apresentaram diferenças na produção de matéria seca e no acúmulo de nutrientes.	A escolha da espécie influencia diretamente a quantidade de palhada, a ciclagem de nutrientes e os benefícios ao solo.
Soratto et al. (2022)	Analisar o desempenho de espécies de cobertura na proteção do solo e no manejo conservacionista.	Gramíneas apresentaram boa capacidade de cobertura superficial, proteção contra erosão e produção de biomassa.	As gramíneas são importantes para sistemas que buscam formação de palhada e proteção física do solo.

Fonte: o autor (2026).

A sistematização dos estudos evidencia que a compactação do solo compromete diretamente atributos físicos essenciais, como porosidade, infiltração de água, aeração e crescimento radicular. Observa-se também que as plantas de cobertura atuam como estratégia importante na melhoria da qualidade física do solo, principalmente por meio da produção de palhada, do aumento da matéria orgânica, da ciclagem de nutrientes e da formação de canais radiculares. Espécies como mucuna-preta, crotalária-júncea, braquiária, milheto, aveia-preta e nabo-forrageiro apresentam diferentes mecanismos de atuação, podendo ser utilizadas isoladamente

ou em consórcio, conforme o tipo de solo, o grau de compactação e o objetivo do manejo.

4.2 DISCUSSÕES

Os estudos analisados demonstram que a compactação do solo deve ser compreendida como uma das principais limitações físicas à sustentabilidade dos sistemas agrícolas, pois interfere diretamente na porosidade, na infiltração de água, na aeração e no crescimento radicular das culturas. Richart *et al.* (2005) destacam que a compactação está associada, principalmente, ao tráfego de máquinas, ao manejo inadequado e à redução da qualidade estrutural do solo. Essa constatação é reforçada por Reichert, Suzuki e Reinert (2007), ao apontarem que o aumento da resistência mecânica à penetração e a redução da macroporosidade comprometem o desenvolvimento das raízes e diminuem a capacidade produtiva das áreas agrícolas. Assim, observa-se que a compactação não representa apenas um problema localizado, mas um processo de degradação que afeta o funcionamento físico, químico e biológico do solo.

A relação entre compactação e produtividade agrícola aparece de forma expressiva nos estudos de Freddi *et al.* (2007) e Lima *et al.* (2010). Freddi *et al.* (2007), ao avaliarem os efeitos da compactação sobre a cultura do milho, demonstraram que o aumento da resistência do solo prejudica o crescimento radicular e interfere no desempenho produtivo da cultura. De modo semelhante, Lima *et al.* (2010) evidenciaram que a resistência à penetração pode ser utilizada como indicador importante para diagnosticar limitações físicas no solo. Esses resultados revelam que a compactação limita o volume de solo explorado pelas raízes, reduzindo a absorção de água e nutrientes, especialmente em períodos de estiagem. Portanto, a produtividade das culturas depende diretamente da manutenção de condições físicas adequadas no perfil do solo.

Outro ponto relevante observado na literatura é que a compactação interfere na dinâmica da água no solo. A redução da macroporosidade compromete a infiltração, favorece o escoamento superficial e pode intensificar processos erosivos, principalmente em áreas sem cobertura vegetal. Kochhann; Denardin; Berton (2000) destacam que a compactação e a descompactação devem ser analisadas considerando o tipo de solo, o sistema de manejo e o grau de adensamento das

camadas. Nesse sentido, a compactação não apenas dificulta a entrada de água no solo, mas também reduz sua capacidade de armazenamento, tornando as plantas mais vulneráveis a déficits hídricos. A discussão evidencia que a melhoria da infiltração depende de práticas que promovam continuidade de poros, estabilidade de agregados e proteção da superfície.

As práticas conservacionistas aparecem como alternativas importantes para reduzir os efeitos da compactação. A Embrapa (2024) destaca que a cobertura permanente do solo, a rotação de culturas e o plantio direto bem conduzido contribuem para melhorar a estrutura física e a infiltração de água. No entanto, é importante ressaltar que o plantio direto, quando mal manejado, também pode apresentar camadas compactadas, principalmente em áreas com tráfego repetido de máquinas e baixa diversificação de culturas. Dessa forma, não basta adotar uma prática de forma isolada; é necessário integrar cobertura vegetal, rotação de espécies, controle de tráfego e aporte contínuo de matéria orgânica para que ocorram melhorias consistentes na qualidade física do solo.

Nesse contexto, as plantas de cobertura assumem papel central como estratégia de mitigação da compactação. Foloni, Lima e Büll (2006) demonstraram que determinadas espécies apresentam maior capacidade de crescimento radicular em camadas compactadas, com destaque para a mucuna-preta e a crotalária-júncea. Esse resultado é importante porque indica que algumas plantas de cobertura podem atuar como agentes biológicos de reestruturação do solo, formando canais naturais que permanecem após a decomposição das raízes. Esses canais, conhecidos como bioporos, favorecem a infiltração de água, a aeração e o crescimento das raízes das culturas subsequentes. Assim, a escolha da espécie de cobertura deve considerar não apenas a produção de biomassa, mas também o tipo e a profundidade do sistema radicular.

O nabo-forrageiro também se destaca como espécie relevante para solos compactados. Segundo a Embrapa (2021), essa planta apresenta raiz pivotante profunda, crescimento rápido e capacidade de melhorar a permeabilidade do solo. Essa característica permite sua utilização em sistemas agrícolas que buscam a chamada descompactação biológica, especialmente quando associado a outras espécies de cobertura. Contudo, sua decomposição rápida indica que o manejo deve ser planejado de forma integrada, podendo ser combinado com gramíneas de maior persistência de palhada, como aveia-preta, milheto ou braquiária. Essa associação

amplia os benefícios ao solo, unindo formação de canais radiculares, cobertura superficial e aporte de matéria orgânica.

As gramíneas, por sua vez, apresentam grande importância na formação de palhada e na proteção da superfície do solo. Calegari *et al.* (1993) destacam que espécies utilizadas como adubos verdes e plantas de cobertura contribuem para a produção de biomassa, ciclagem de nutrientes e melhoria da estrutura do solo. Em sistemas agrícolas brasileiros, gramíneas como braquiária, milheto e aveia-preta são relevantes por apresentarem sistema radicular fasciculado, com grande volume de raízes finas. Essas raízes contribuem para a agregação das partículas, aumento da estabilidade estrutural e maior proteção contra a desagregação causada pela chuva. Dessa forma, enquanto espécies como o nabo-forrageiro atuam com raízes mais profundas, as gramíneas contribuem para uma rede radicular mais densa e contínua.

A matéria orgânica aparece como elemento essencial na recuperação de solos compactados. Bayer e Mielniczuk (2017) ressaltam que a matéria orgânica influencia a fertilidade, a agregação, a retenção de água e a atividade biológica do solo. Loss *et al.* (2011), ao avaliarem sistemas sob plantio direto com integração lavoura-pecuária, observaram que o maior aporte de resíduos vegetais favoreceu a agregação, o carbono e o nitrogênio do solo. Esses achados indicam que a melhoria da estrutura física não depende apenas da ação mecânica das raízes, mas também da incorporação gradual de resíduos vegetais ao sistema. Assim, o uso contínuo de plantas de cobertura contribui para o aumento da matéria orgânica e, conseqüentemente, para maior resistência do solo à compactação.

A atividade biológica também representa um componente fundamental nesse processo. A presença de palhada, raízes vivas e resíduos em decomposição fornece alimento e energia para microrganismos e organismos da fauna edáfica, que participam da decomposição da matéria orgânica, da formação de agregados e da abertura de canais no solo. Richart *et al.* (2005) destacam que a compactação pode reduzir a aeração e prejudicar a atividade biológica, comprometendo processos essenciais ao funcionamento do solo. Nesse sentido, as plantas de cobertura contribuem para restaurar condições favoráveis à biota do solo, especialmente quando associadas à manutenção da palhada e à redução do revolvimento.

A ciclagem de nutrientes é outro benefício relevante das plantas de cobertura em solos compactados. Pacheco *et al.* (2011) demonstraram que diferentes espécies de cobertura apresentam capacidade de produzir biomassa e acumular nutrientes,

contribuindo para a ciclagem em sistemas agrícolas com arroz de terras altas e soja. Esse processo é importante porque as plantas de cobertura podem absorver nutrientes em camadas mais profundas e devolvê-los à superfície por meio da decomposição da biomassa. Em áreas compactadas, essa função ganha ainda mais importância, pois a compactação limita o crescimento radicular das culturas comerciais e pode reduzir o aproveitamento dos nutrientes disponíveis no perfil do solo.

A comparação entre os estudos evidencia que não existe uma única espécie de planta de cobertura capaz de resolver todos os problemas de compactação e degradação do solo. Cada grupo vegetal apresenta funções específicas: gramíneas contribuem para cobertura superficial e produção de palhada; leguminosas favorecem fixação biológica de nitrogênio e ciclagem de nutrientes; brassicáceas, como o nabo-forrageiro, auxiliam na formação de canais profundos e na descompactação biológica.

Os estudos analisados também apontam que os efeitos das plantas de cobertura sobre a compactação não são imediatos. A recuperação da estrutura física do solo é um processo gradual, dependente da repetição de práticas conservacionistas ao longo de diferentes safras. O uso pontual de uma espécie pode trazer benefícios temporários, mas melhorias consistentes exigem continuidade no aporte de biomassa, manutenção da palhada, diversificação radicular e redução do tráfego excessivo de máquinas. Essa interpretação está de acordo com Calegari *et al.* (1993), ao destacarem a importância do uso planejado de adubos verdes e plantas de cobertura em sistemas agrícolas conservacionistas.

Outro aspecto importante é que a compactação severa pode limitar o próprio desenvolvimento das plantas de cobertura. Reichert, Suzuki e Reinert (2007) indicam que, em condições de alta resistência mecânica, o crescimento radicular pode ser restringido, reduzindo a eficiência da descompactação biológica. Isso significa que, em alguns casos, práticas mecânicas pontuais podem ser necessárias antes da implantação de sistemas biológicos de recuperação. No entanto, a descompactação mecânica isolada tende a apresentar efeito temporário se não for acompanhada de cobertura vegetal, rotação de culturas e aumento da matéria orgânica. Portanto, o manejo integrado é mais eficiente do que intervenções isoladas.

A análise dos resultados também permite destacar o papel da cobertura vegetal na redução da erosão e na proteção superficial do solo. Embora o foco deste trabalho seja a compactação, a literatura demonstra que compactação e erosão estão

frequentemente associadas. Solos compactados apresentam menor infiltração de água e maior escoamento superficial, o que aumenta o risco de perda de partículas e nutrientes. A manutenção da palhada sobre o solo, conforme discutido pela Embrapa (2024), reduz o impacto das gotas de chuva, melhora a infiltração e protege a superfície contra processos erosivos. Assim, as plantas de cobertura atuam simultaneamente na mitigação da compactação e na conservação geral do solo.

Do ponto de vista agrônômico, os resultados sistematizados reforçam que o uso de plantas de cobertura pode contribuir para sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis. Ao melhorar a estrutura do solo, aumentar a matéria orgânica, favorecer a infiltração de água e estimular a atividade biológica, essas espécies reduzem a dependência de intervenções corretivas e contribuem para maior estabilidade produtiva. Hungria *et al.* (2009) e Hungria e Mendes (2015) também destacam a importância dos microrganismos e da fixação biológica de nitrogênio para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, especialmente quando leguminosas são inseridas no manejo.

A discussão dos estudos demonstra, ainda, que a adoção de plantas de cobertura deve considerar aspectos práticos, como disponibilidade de sementes, custo de implantação, janela de semeadura, adaptação climática e compatibilidade com a cultura seguinte. Espécies com alto potencial técnico podem apresentar baixa adoção quando não se ajustam ao calendário agrícola ou quando exigem manejo mais complexo. Por isso, a recomendação técnica deve considerar as condições reais do produtor e da região. O sucesso do manejo depende da escolha correta da espécie, do momento de implantação e da forma de dessecação ou manejo da palhada.

De modo geral, os trabalhos analisados convergem ao indicar que as plantas de cobertura constituem alternativa eficiente para melhorar a qualidade física do solo e reduzir os efeitos da compactação, desde que inseridas em um sistema de manejo conservacionista. A compactação não deve ser tratada apenas como um problema mecânico, mas como resultado da interação entre tráfego de máquinas, baixa cobertura, pouca matéria orgânica e baixa diversidade biológica. Dessa forma, a recuperação de solos compactados exige uma abordagem integrada, baseada na combinação de plantas de cobertura, rotação de culturas, plantio direto bem conduzido e manejo adequado do tráfego agrícola.

Por fim, a revisão evidencia que ainda existem lacunas importantes a serem aprofundadas em estudos futuros. Entre elas, destacam-se a necessidade de avaliar

o desempenho de diferentes consórcios de plantas de cobertura em solos com graus variados de compactação, o tempo necessário para recuperação estrutural em diferentes classes de solo e a eficiência de espécies em diferentes condições climáticas brasileiras. Também são necessários estudos de longa duração que relacionem compactação, produtividade, matéria orgânica, bioporos e atividade biológica em sistemas reais de produção. Apesar dessas lacunas, a literatura nacional já oferece evidências consistentes de que as plantas de cobertura representam uma estratégia promissora para a recuperação física do solo e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

5. CONCLUSÕES

A presente revisão bibliográfica sistematizada permitiu alcançar o objetivo geral proposto, ao analisar a influência das plantas de cobertura na redução da compactação do solo em sistemas agrícolas, considerando seus efeitos sobre a estrutura física, a porosidade, a infiltração de água e o desenvolvimento radicular. A partir da literatura consultada, verificou-se que as plantas de cobertura exercem papel relevante na melhoria da qualidade física do solo, especialmente quando associadas a práticas conservacionistas como o plantio direto, a rotação de culturas, a manutenção da palhada e o manejo adequado do tráfego de máquinas.

O primeiro objetivo específico, referente à descrição dos principais fatores que contribuem para a compactação do solo e seus impactos na produtividade agrícola, também foi atendido. Os estudos analisados demonstraram que a compactação está diretamente relacionada ao uso intensivo de máquinas agrícolas, ao tráfego em condições inadequadas de umidade, à baixa cobertura vegetal, à monocultura e à redução do teor de matéria orgânica. Esses fatores favorecem o aumento da densidade do solo, a redução da macroporosidade e o aumento da resistência mecânica à penetração das raízes, comprometendo a absorção de água e nutrientes e podendo refletir negativamente na produtividade das culturas.

O segundo objetivo específico, que buscou identificar espécies de plantas de cobertura utilizadas em sistemas agrícolas e seus benefícios para a melhoria da qualidade física do solo, foi contemplado por meio da análise de diferentes grupos vegetais. Gramíneas, como braquiária, milho e aveia-preta, destacaram-se pela elevada produção de biomassa, formação de palhada e proteção superficial do solo. Leguminosas, como crotalária, mucuna-preta e feijão-de-porco, apresentaram importância pela fixação biológica de nitrogênio, ciclagem de nutrientes e estímulo à atividade biológica. Já o nabo-forrageiro demonstrou relevância pela raiz pivotante profunda, capaz de favorecer a formação de canais naturais e melhorar a infiltração de água em camadas mais compactadas.

O terceiro objetivo específico, relacionado à sistematização de informações sobre a contribuição das plantas de cobertura para a formação de bioporos, aumento da porosidade, infiltração de água e desenvolvimento radicular, foi alcançado a partir da comparação dos estudos selecionados. Observou-se que o sistema radicular das plantas de cobertura constitui um dos principais mecanismos de reestruturação física

do solo. As raízes exploram diferentes profundidades, atravessam zonas de maior resistência e, após sua decomposição, deixam canais naturais que podem ser utilizados pelas culturas subsequentes. Esse processo, conhecido como descompactação biológica, contribui para a melhoria gradual da porosidade, da aeração, da infiltração de água e do crescimento radicular.

O quarto objetivo específico, voltado à discussão da aplicabilidade das plantas de cobertura como estratégia conservacionista em diferentes contextos agrícolas, também foi atingido. A revisão demonstrou que a eficiência dessas espécies depende de fatores como tipo de solo, grau de compactação, clima regional, cultura principal, janela de semeadura, produção de biomassa e manejo da palhada. Dessa forma, a escolha da espécie ou do consórcio de espécies deve ser planejada conforme o objetivo do produtor e as condições locais, evitando recomendações generalizadas que possam reduzir a eficiência do manejo.

A análise dos estudos também permitiu concluir que as plantas de cobertura atuam em diferentes dimensões da qualidade do solo. Na dimensão física, contribuem para a redução da compactação, aumento da porosidade, melhoria da infiltração de água e proteção contra o escoamento superficial. Na dimensão química, favorecem a ciclagem de nutrientes, a fixação biológica de nitrogênio e o aumento da disponibilidade de elementos essenciais às culturas subsequentes. Na dimensão biológica, estimulam a atividade microbiana, a decomposição de resíduos vegetais e a formação de agregados estáveis, fatores fundamentais para a recuperação gradual de solos compactados.

A matéria orgânica demonstrou ser elemento central na recuperação de solos compactados. O aumento do aporte de palhada e raízes favorece a agregação das partículas, a retenção de água, a estabilidade estrutural e a atividade dos organismos do solo. Assim, a recuperação de solos compactados não depende apenas da ação física das raízes, mas da integração entre matéria orgânica, atividade biológica, porosidade, ciclagem de nutrientes e manejo conservacionista contínuo.

A revisão também evidenciou que o uso isolado de plantas de cobertura pode não ser suficiente para reverter quadros severos de compactação. Em áreas com camadas muito adensadas, pode ser necessário associar práticas mecânicas pontuais a estratégias biológicas e conservacionistas de médio e longo prazo. No entanto, a descompactação mecânica, quando realizada sem posterior manutenção da cobertura vegetal, tende a apresentar efeito temporário. Por isso, o manejo mais

eficiente é aquele que combina plantas de cobertura, rotação de culturas, controle do tráfego agrícola, manutenção da palhada e aumento contínuo da matéria orgânica.

Do ponto de vista da sustentabilidade, as plantas de cobertura contribuem para reduzir a degradação física, melhorar a infiltração de água, proteger o solo contra erosão, favorecer a biodiversidade edáfica e diminuir a dependência de intervenções corretivas. Além dos benefícios agronômicos, essas práticas apresentam importância ambiental, pois auxiliam na conservação dos recursos naturais, na redução de perdas de solo e nutrientes e na construção de sistemas produtivos mais resilientes.

Apesar dos resultados positivos observados na literatura, ainda existem lacunas que merecem ser aprofundadas em pesquisas futuras. Destacam-se a necessidade de estudos de longa duração sobre o desempenho de consórcios de plantas de cobertura em diferentes níveis de compactação, a avaliação do tempo necessário para recuperação estrutural em distintas classes de solo e a relação entre bioporos, matéria orgânica, atividade biológica e produtividade agrícola. Essas investigações podem contribuir para recomendações técnicas mais precisas e adaptadas às diferentes realidades agrícolas brasileiras.

Conclui-se, portanto, que os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, uma vez que a revisão permitiu identificar as causas e consequências da compactação, sistematizar os efeitos das plantas de cobertura sobre os atributos físicos do solo, comparar espécies com diferentes funções agronômicas e discutir sua aplicabilidade como estratégia conservacionista. Assim, as plantas de cobertura constituem alternativa promissora para a redução dos efeitos da compactação do solo, desde que inseridas em um sistema de manejo integrado, contínuo e tecnicamente planejado. Seus benefícios vão além da proteção superficial, envolvendo melhoria da estrutura física, aumento da matéria orgânica, estímulo à atividade biológica, ciclagem de nutrientes e formação de canais radiculares, contribuindo para uma agricultura mais sustentável, eficiente e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

AGRIQ. Plantas de cobertura: o que são, quais os benefícios e quais espécies utilizar. **AgriQ**, [s.d.]. Disponível em: <https://agriq.com.br/plantas-de-cobertura/>. Acesso em: 23 maio 2025.

AGROADVANCE. Blog Plantas de cobertura: o que são e quais os benefícios. **AgroAdvance**, [s.d.]. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-plantas-de-cobertura/>. Acesso em: 23 mai. 2025.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. *The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate*. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, v. 41, n. 9-10, p. 1024–1030, 2017.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fundamentos da matéria orgânica do solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2017. p. 7-18.

BOARDMAN, J.; POESEN, J. (eds.). *Soil erosion in Europe*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

BOLLIGER, Adrian *et al.* Taking stock of the Brazilian "zero-till revolution": A review of landmark research and farmers' practice. **Advances in Agronomy**, v. 91, p. 47-110, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222675192_Taking_Stock_of_the_Brazilian_Zero-Till_Revolution_A_Review_of_Landmark_Research_and_Farmers%27_Practice. Acesso em: 28 mai. 2026.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The nature and properties of soils*. 15th ed. Boston: Pearson, 2016.

CALEGARI, A. *et al.* **Adubação verde no sul do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1993. Disponível em: <https://biblioteca.epagri.sc.gov.br/consulta/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=%28autoria%3A%22T.%22%29&id=7708&paginaAtual=29&paginacao=t&qFacets=%28autoria%3A%22T.%22%29&sort=titulo-sort&utm>. Acesso em: 30 mai. 2026.

CASTRO, G. S. A. *et al.* Produção, decomposição e ciclagem de nutrientes em resíduos de crotalaria e milheto, cultivados solteiros e consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 10, p. 1462-1470, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/5b1eddc-b7fa-4e60-be5b-700e89cfa9d9/content>. Acesso em: 30 mai. 2026.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 20 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 19). Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/850205/1/CNPT-DOCUMENTOS-19-COMPACTACAO-E-DESCOMPACTACAO-DE-SOLOS-FL-12060a-.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2026.

DERPSCH, Rolf *et al.* Global overview of conservation agriculture adoption. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 8, n. 3, p. 161-168, 2010.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104717, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198720306590>. Acesso em: 23 maio 2025.

DREGNE, Harold E. Land degradation in the drylands. **Arid Land Research and Management**, v. 16, n. 2, p. 99-132, 2002.

DUARTE JÚNIOR, J. B. *et al.* Plantas de cobertura e seus efeitos na fertilidade do solo e na produtividade agrícola. **Revista de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 35, n. 4, p. 289-297, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Compactação do solo. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica – Sistema Plantio Direto**, Brasília, DF, 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Infiltração. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica – Sistema Plantio Direto**, Brasília, DF, 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manejar a matéria orgânica do solo é manejar a qualidade do sistema do solo. **Embrapa**, Brasília, DF, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Nabo forrageiro. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica – Sistema Plantio Direto**, Brasília, DF, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Pesquisa de opinião aponta que maioria dos produtores rurais adota plantas de cobertura. **Embrapa**, Brasília, DF, 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Rotação de culturas. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica – Milho**, Brasília, DF, 2024.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L. de; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 49-57, 2006.

FREDDI, O. S. *et al.* Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 627-636, 2007.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

<https://www.nature.com/articles/s41467-023-44464-9>. Acesso em: 23 maio 2025.

HUNGRIA, M. *et al.* Importância dos microrganismos na fertilidade do solo e na produtividade agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 8, p. 617-628, 2009.

HUNGRIA, Mariangela; MENDES, Ieda de Carvalho. A contribuição da fixação biológica de nitrogênio para sistemas agrícolas sustentáveis nos trópicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 3, p. 217-234, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/9bhKYVMG4C3KTsRvtgph3FG/?lang=en>. Acesso em: 3 abr. 2025.

HUNGRIA, Mariangela; VARGAS, Matias A. Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field Crops Research**, v. 65, p. 151-164, 2000.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LAL, Rattan. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015.

LAL, Rattan. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. **Food Security**, v. 1, p. 45-57, 2009.

LIMA, C. L. R. de *et al.* Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 1, p. 89-98, jan. 2010.

LOSS, A. *et al.* Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, out. 2011.

MACHADO, Pedro L. O. A.; SILVA, Carlos A. T. Manejo da palhada no plantio direto: benefícios para a conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. 1-20, 2021.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

NATURE COMMUNICATIONS. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. **Nature Communications**, v. 14, p. 44464, 2023. Disponível em:

NOVOTNY, V.; OLEM, H. *Water quality: prevention, identification, and management of diffuse pollution*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.

PACHECO, L. P. *et al.* Produção e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura nas culturas de arroz de terras altas e de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1787-1799, 2011.

PIMENTEL, David; BURGESS, Mary. Soil erosion threatens food production. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 162, p. 1-6, 2013.

PIMENTEL, David *et al.* Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v. 267, n. 5201, p. 1117-1123, 1995.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

REICOSKY, D. C. Conservation agriculture: global environmental benefits of soil carbon management. In: LAL, R.; STEWART, B. A. (eds.). *Soil management of climate-smart agriculture*. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 11–36.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49-134.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, Amsterdam, v. 152, n. 3-4, p. 252–263, 2009.

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

SALTON, J. C. *et al.* Plantas de cobertura e a dinâmica da matéria orgânica no solo em sistemas conservacionistas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 4, p. 431-440, 2014.

SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT. Effectiveness of terracing techniques for controlling soil erosion by water. **Science of The Total Environment**, v. 703, p. 134972, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720312949>. Acesso em: 23 maio 2025.

SODRÉ FILHO, J. *et al.* Efeito de plantas de cobertura no controle de plantas daninhas em cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 79-91, 2017.

SORATTO, Rogério Peres *et al.* Cover crops enhance soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystem. **CCarbon**, 2022. Disponível em: <https://ccarbon.usp.br/cover-crops-enhance-soil-health-crop-yield-and-resilience-of-tropical-agroecosystem/>. Acesso em: 3 abr. 2025.

TILMAN, David *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, p. 671-677, 2002.

TORRES, J. L. R. *et al.* Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1910-1918, 2014.

UNIPACS. A erosão do solo: causas e consequências para o meio ambiente. **UNIPACS**, [s.d.]. Disponível em: <https://unipacs.com.br/sem-categoria/a-erosao-do-solo/>. Acesso em: 23 maio 2025.

ZOLIN, Cornélio Alberto *et al.* Short-term effect of a crop-livestock-forestry system on soil, water, and nutrient loss in the Cerrado-Amazon ecotone. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, 2021. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1137003/1/2021-cpamt-caz-short-term-effect-crop-livestock-forestry-system-soil-water.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2025.