

CAPÍTULO 9

Desafios e perspectivas da agricultura sustentável: impactos da agricultura convencional e práticas agroecológicas para a recuperação do solo e da produção de café

Paloma Imaculada de Oliveira Besteti, Regiane Carla Bolzan Carvalho, Karenn Zavarize Bermond, Luana Salvador, Mayra da Silva Polastrelli Lima, Ludmila Lisboa Porto, Paola Delatorre Rodrigues, Alex Justino Zacarias, Atanásio Alves do Amaral, Juliana de Faria Goronci, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c9>

Resumo

Este trabalho aborda os impactos negativos da agricultura convencional na qualidade do solo e na sustentabilidade dos sistemas produtivos, destacando aspectos como degradação do solo, compactação, perda de biodiversidade e dependência de insumos químicos. Discute-se também a importância de práticas sustentáveis, como rotação de culturas, adubação verde e cobertura do solo, que promovem a recuperação da fertilidade, o aumento da biodiversidade edáfica e a conservação ambiental. A avaliação da produtividade e da qualidade do café é enfatizada como fundamental para o sucesso da cafeicultura sustentável. Por fim, o papel da pesquisa e da inovação é destacado como elemento-chave para o desenvolvimento de sistemas produtivos resilientes e adaptados aos desafios ambientais e econômicos atuais. O texto se fundamenta em referências atualizadas e aponta caminhos para a transição agroecológica, buscando garantir a viabilidade econômica e ambiental da agricultura no longo prazo.

Palavras-Chave: Degradação do solo. Agricultura sustentável. Manejo agroecológico. Biodiversidade do solo. Café. Inovação agrícola. Adubação verde. Rotação de culturas. Sustentabilidade ambiental.

1. Introdução

A agricultura convencional, marcada pelo uso intensivo de insumos químicos — como fertilizantes sintéticos e pesticidas —, tem gerado crescentes preocupações quanto à sustentabilidade dos sistemas produtivos e à qualidade dos solos agrícolas. Embora esse modelo tenha promovido aumentos significativos na produtividade nas últimas décadas, seus impactos negativos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo são amplamente reconhecidos e documentados (Tilman *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2025).

Um dos principais efeitos adversos da agricultura convencional é a degradação da estrutura do solo. O uso contínuo e excessivo de fertilizantes nitrogenados pode provocar acidificação do solo, o que reduz a capacidade de troca de cátions (CTC) e compromete a atividade microbiológica fundamental para a ciclagem de nutrientes. Pesquisas demonstram que a acidificação decorrente da aplicação prolongada de ureia e nitrato de amônio prejudica o desenvolvimento radicular, diminui a retenção hídrica e compromete a produtividade agrícola em longo prazo (Smith *et al.*, 2018; Silva; Souza, 2021).

Adicionalmente, práticas como o preparo frequente do solo com maquinário pesado contribuem para sua compactação, reduzindo a porosidade, dificultando a penetração das raízes e limitando a oxigenação das camadas mais profundas. Esses fatores impactam diretamente a resiliência do sistema solo-planta, tornando-o mais vulnerável a eventos climáticos extremos, como secas e chuvas intensas (Jones, 2019).

Outro aspecto crítico se refere à biodiversidade edáfica. O uso indiscriminado de pesticidas de amplo espectro afeta não apenas as pragas-alvo, mas também organismos benéficos, como anelídeos, artrópodes e microrganismos decompositores. Esses organismos desempenham papéis essenciais na formação do húmus e na decomposição da matéria orgânica. Sua eliminação resulta em declínio da fertilidade natural do solo, aumentando a dependência por insumos externos (Fowler, 2020; Souza *et al.*, 2024b).

Do ponto de vista ambiental, a agricultura convencional também é responsável por significativa poluição do solo e da água. O escoamento superficial que carrega nitratos, fosfatos e resíduos de agrotóxicos pode atingir corpos d'água, favorecendo a eutrofização — um processo de proliferação

excessiva de algas que compromete a qualidade da água e a biodiversidade aquática (Carpenter *et al.*, 2016). Esse fenômeno pode afetar negativamente o abastecimento de água potável e aumentar os custos de tratamento.

Em longo prazo, a manutenção desse modelo produtivo tende a esgotar os nutrientes do solo, dificultando sua regeneração natural e reduzindo sua capacidade de adaptação às mudanças climáticas. Isso cria um ciclo de dependência cada vez maior de fertilizantes e pesticidas, elevando os custos de produção e intensificando os impactos ambientais (Tilman *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2024a).

Diante desses desafios, práticas alternativas vêm sendo cada vez mais promovidas, como a agricultura orgânica, a agroecologia e o manejo agroecológico do solo. Essas abordagens buscam restaurar e conservar os atributos funcionais do solo, baseando-se em princípios ecológicos que priorizam a biodiversidade, a rotação de culturas, o uso de adubação verde, compostos como o bokashi (Souza, 2023), e o controle biológico de pragas (Gomiero *et al.*, 2011; Souza; Souza *et al.*, 2025).

A transição agroecológica representa um caminho promissor para reverter os impactos negativos da agricultura convencional. Ela implica mudanças profundas nos sistemas produtivos, com ênfase na autonomia dos agricultores, no conhecimento tradicional e na sustentabilidade ecológica (Souza *et al.*, 2024c). Além disso, está diretamente vinculada à promoção dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma vez que contribui para a segurança alimentar, conservação ambiental e equidade social (Souza *et al.*, 2025).

2. Degradação do solo

A agricultura convencional, alicerçada no uso intensivo de fertilizantes sintéticos e defensivos químicos, é apontada como uma das principais causas da degradação da qualidade dos solos em áreas agrícolas. Essa forma de manejo, muitas vezes desconsiderando a conservação da matéria orgânica e os ciclos naturais do solo, promove alterações substanciais em seus atributos físicos, químicos e biológicos (Primavesi, 2002; Souza *et al.*, 2025) (Figura 1).



Figura 1. Corpo hídrico eutrofizado (presença de macrófitas), resultante da degradação dos solos a montante, com contaminação por nitrogênio (N) e fósforo (P). Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2025.

Entre os efeitos mais severos se destaca a redução da matéria orgânica, elemento fundamental para a manutenção da fertilidade, da estrutura e da capacidade de retenção hídrica do solo. A matéria orgânica funciona como um agente estabilizador, favorecendo a formação de agregados estáveis, ampliando a capacidade de troca de cátions (CTC) e promovendo a retenção eficiente de água e nutrientes (Primavesi, 2002; Silva; Souza, 2021). No entanto, práticas convencionais como a remoção sistemática de resíduos vegetais, a ausência de reposição orgânica e o uso desequilibrado de adubos minerais comprometem esses benefícios, resultando em solos compactados, empobrecidos e com baixa capacidade de suporte às culturas (Figura 2).

Adicionalmente, o uso frequente e indiscriminado de insumos químicos impacta diretamente a biota do solo. A perda de diversidade microbiana, essencial para a decomposição da matéria orgânica e para a ciclagem de nutrientes, fragiliza o sistema edáfico, tornando-o mais vulnerável ao aparecimento de pragas e doenças. Esse desequilíbrio biológico favorece um ciclo de dependência progressiva de agroquímicos, perpetuando a degradação e ampliando os custos de produção (Souza *et al.*, 2024a; Primavesi, 2002).



Figura 2. Pastagem degradada devido à ausência de práticas conservacionistas e redução da matéria orgânica. Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2025.

Em médio e longo prazo, os efeitos dessa degradação extrapolam os limites produtivos, comprometendo a sustentabilidade dos agroecossistemas. Entre os impactos mais evidentes estão o empobrecimento da biodiversidade do solo, a deterioração da qualidade da água, alterações no microclima local e a intensificação de processos erosivos — que, em áreas suscetíveis, podem evoluir para a formação de voçorocas, sobretudo em solos desprotegidos e de baixa coesão (Souza *et al.*, 2024b; Primavesi, 2002).

Nesse contexto, torna-se indispensável a transição para práticas agrícolas sustentáveis que favoreçam a regeneração do solo. Estratégias como a rotação de culturas, a adubação verde e o manejo ecológico da fertilidade permitem restaurar a matéria orgânica, melhorar a estrutura e a atividade biológica do solo, além de aumentar sua resiliência. A rotação de culturas quebra os ciclos de patógenos, melhora o equilíbrio nutricional e diversifica os sistemas produtivos. Já a adubação verde, sobretudo com leguminosas, contribui com a fixação biológica de nitrogênio, promove a descompactação do solo e enriquece seu conteúdo orgânico (Altieri; Nicholls; Vazquez, 2007; Souza *et al.*, 2024c).

Portanto, o manejo sustentável do solo — com ênfase na recomposição da matéria orgânica, no estímulo à atividade biológica e na valorização dos processos ecológicos — é condição indispensável para reverter os danos provocados pela agricultura convencional. Essa abordagem é essencial para assegurar a resiliência dos sistemas produtivos, garantir a viabilidade da

produção agrícola e contribuir para a realização dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Souza *et al.*, 2025) (Figura 3).



Figura 3. Cafezal cultivado em sistema agroflorestal (SAF), em consórcio com frutíferas e leguminosas, com manejo do mato e uso de práticas conservacionistas. Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2025.

3. Dependência de insumos

A agricultura convencional se caracteriza por uma crescente dependência de insumos químicos, como fertilizantes sintéticos e defensivos agrícolas, configurando um ciclo vicioso que compromete tanto a resiliência dos solos quanto a sustentabilidade da produção agrícola. O uso contínuo e intensivo desses insumos não apenas acelera a degradação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como também contribui para a contaminação dos recursos hídricos, prejudicando a saúde dos ecossistemas e limitando a capacidade autorreguladora dos sistemas edáficos (Altieri; Nicholls; Vazquez, 2007; Souza *et al.*, 2025a).

Essa dependência impõe aos agricultores a necessidade de aplicação progressiva de doses cada vez maiores de fertilizantes e pesticidas para manter níveis mínimos de produtividade. Essa lógica intensiva eleva significativamente os custos de produção, tornando as propriedades rurais vulneráveis às oscilações dos preços dos insumos no mercado internacional e à instabilidade

das cadeias de suprimentos (Souza *et al.*, 2025b). Além disso, a aplicação excessiva e prolongada de produtos químicos compromete a biodiversidade edáfica — afetando microrganismos, invertebrados e outros organismos essenciais à ciclagem de nutrientes —, com repercussões negativas para a fertilidade do solo e, em casos extremos, para a saúde humana, por meio da entrada de resíduos químicos na cadeia alimentar (Figura 4).



Figura 4. Impactos do uso de agrotóxicos. Fonte: https://ipsaglobal.org/wp-content/uploads/2024/05/Impacts_of_Pesticides_Use.pdf.

Do ponto de vista ambiental, os impactos dessa dependência são alarmantes. O excesso de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, oriundos da adubação mineral, frequentemente é transportado por escoamento superficial para corpos hídricos, promovendo processos de eutrofização em rios, lagos e reservatórios. Esse fenômeno compromete a qualidade da água, provoca a morte de organismos aquáticos e reduz a biodiversidade (Carpenter *et al.*, 2016). Paralelamente, a aplicação recorrente de pesticidas favorece a seleção de pragas resistentes, exigindo a utilização de doses ainda maiores ou a substituição por substâncias mais tóxicas, o que perpetua o ciclo de degradação ambiental e sanitária (Altieri; Nicholls; Vazquez, 2007).

Frente a esses desafios, diversas abordagens têm sido promovidas como alternativas sustentáveis ao modelo convencional. A agricultura orgânica, a

agroecologia e o manejo agroecológico do solo constituem estratégias que visam reduzir a dependência de insumos externos, restaurar a fertilidade natural e valorizar os processos ecológicos. A rotação de culturas, o uso de adubação verde e a introdução de compostos orgânicos, como o bokashi, promovem a recuperação da matéria orgânica, fortalecem a microbiota do solo e melhoram o equilíbrio dos agroecossistemas (Souza *et al.*, 2024a; Souza, 2023; Souza *et al.*, 2025a) (Figura 5).



Figura 5. Manejo agroecológico do solo. Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2025.

Essas práticas não apenas contribuem para a melhoria da qualidade do solo, mas também reduzem os custos operacionais, aumentam a eficiência dos sistemas produtivos e os tornam mais resilientes às mudanças climáticas e às instabilidades econômicas. Como destacam Souza *et al.* (2025b), a recuperação de áreas degradadas por meio da reabilitação ambiental exige a substituição de práticas exaustivas por manejos regenerativos, fundamentados na integração entre ciência, conhecimento tradicional e princípios ecológicos.

Assim, a transição para modelos de produção mais sustentáveis é fundamental para romper com a lógica da dependência química. Trata-se de uma estratégia indispensável não apenas para garantir a viabilidade econômica e ambiental da agricultura, mas também para promover uma produção equilibrada, socialmente justa e ecologicamente duradoura (Souza *et al.*, 2024c; Souza *et al.*, 2025b).

4. Compactação do solo

A mecanização intensiva e o tráfego constante de máquinas pesadas sobre as áreas agrícolas constituem fatores determinantes para a compactação do solo. A passagem frequente de tratores, colheitadeiras e outros equipamentos promove a compressão das partículas do solo, reduzindo sua porosidade e aeração — condições essenciais para o desenvolvimento radicular saudável e para a absorção adequada de água e nutrientes pelas plantas (Primavesi, 2002; Souza *et al.*, 2025a). Como consequência, ocorre limitação do crescimento das raízes, o que compromete diretamente o vigor das plantas e a produtividade das culturas.

Além disso, a compactação reduz drasticamente a taxa de infiltração da água no solo, favorecendo o escoamento superficial e intensificando os processos erosivos. Essa dinâmica não apenas acarreta a perda de nutrientes essenciais, como também contribui para a degradação estrutural do solo, exigindo volumes maiores de irrigação e adubação para manter níveis produtivos aceitáveis. Tais exigências elevam os custos operacionais e aumentam o risco de contaminação ambiental devido ao uso excessivo de fertilizantes e defensivos (Souza *et al.*, 2025b; Primavesi, 2002).

Frente a esse cenário, diversas estratégias de manejo têm sido recomendadas para mitigar os impactos da compactação. A utilização de maquinário com pneus de maior largura e menor pressão de contato ajuda a distribuir melhor o peso sobre a superfície do solo, reduzindo a compactação. O uso de sistemas de cultivo mínimo, aliando técnicas de manejo conservacionista e tecnologias de agricultura de precisão, tem demonstrado eficácia na preservação da estrutura física do solo e na promoção de um ambiente mais propício ao desenvolvimento das culturas (Souza *et al.*, 2024b; Souza *et al.*, 2025a) (Figura 6).

Práticas agroecológicas e conservacionistas, como a cobertura vegetal permanente e a rotação de culturas, desempenham papel fundamental na prevenção e reversão da compactação. A cobertura vegetal atua como proteção natural contra o impacto direto das chuvas, contribui para o aumento da matéria orgânica e favorece a formação de agregados estáveis. A rotação de culturas, por sua vez, amplia a diversidade radicular, promovendo a bioturbação e

melhorando a porosidade e a aeração do solo (Altieri; Nicholls; Vazquez, 2007; Souza *et al.*, 2024c) (Figura 7).



Figura 6. Sistema de cultivo mínimo aliado às técnicas de manejo conservacionista. Fonte: Dário Rodrigues, 2025.

Essas práticas são essenciais não apenas para reverter os danos físicos causados pela mecanização intensiva, mas também para restaurar a funcionalidade do solo enquanto sistema vivo e dinâmico. A adoção de abordagens ecológicas no manejo do solo contribui para o aumento da infiltração da água, o controle da erosão, a conservação da fertilidade e a manutenção da produtividade agrícola em longo prazo — elementos indispensáveis à sustentabilidade dos agroecossistemas (Souza *et al.*, 2025b).



Figura 7. Sistema agroflorestal (SAF) e mato nas entrelinhas: aliados às técnicas de manejo conservacionista. Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2025.

5. Perda de biodiversidade

A agricultura convencional, ao priorizar sistemas produtivos baseados em monoculturas, contribui significativamente para a redução da biodiversidade nos agroecossistemas. O cultivo extensivo e contínuo de uma única espécie vegetal reduz a complexidade ecológica das áreas agrícolas, limitando a variedade de recursos alimentares e habitats disponíveis para polinizadores, inimigos naturais de pragas, microrganismos e demais organismos benéficos à dinâmica do solo (Altieri; Nicholls; Vazquez, 2007; Singh *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2024b).

Essa simplificação biológica compromete funções ecológicas essenciais, como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e o controle natural de fitopatógenos. A homogeneidade dos sistemas favorece ainda a adaptação e a proliferação de pragas e doenças específicas, o que estimula o uso crescente de defensivos químicos e reforça o ciclo de degradação ambiental e de dependência de insumos externos (Philippot *et al.*, 2013; Powell *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2025a).

Além dos impactos diretos sobre a fauna e flora do solo, a perda de biodiversidade repercute negativamente sobre os atributos físicos e químicos do ambiente edáfico. A redução da diversidade microbiológica e da fauna do solo compromete a formação de agregados estáveis, reduz a capacidade de retenção de água e nutrientes e diminui a resiliência do sistema frente a eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas. Como resultado, intensificam-se os processos erosivos e as perdas de fertilidade (Tscharntke *et al.*, 2012; Souza *et al.*, 2025b).

Nesse contexto, práticas de diversificação agrícola emergem como alternativas estratégicas para restaurar e conservar a biodiversidade funcional dos agroecossistemas (Figura 8). A rotação de culturas, por exemplo, rompe o ciclo de pragas e doenças, melhora o balanço nutricional do solo e promove diferentes formas de ocupação radicular, o que favorece a porosidade e a atividade biológica. Já os sistemas agroflorestais, ao integrar espécies arbóreas e arbustivas com culturas agrícolas, ampliam a diversidade estrutural e funcional da paisagem, oferecendo abrigo e alimento a diversos organismos do solo e da fauna silvestre, além de melhorar o microclima e reduzir a pressão antrópica (Altieri; Nicholls; Vazquez, 2007; Malhi *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2024c).



Figura 8. Impactos das plantas de cobertura na biodiversidade do solo. Fonte: <https://agrotecnico.com.br/impacto-das-plantas-de-cobertura-na-biodiversidade-do-solo/>.

O manejo integrado de pragas (MIP), aliado à adubação verde, também potencializa os efeitos positivos da diversificação. O MIP reduz a dependência de pesticidas sintéticos ao integrar práticas culturais, biológicas e físicas no controle de pragas, promovendo equilíbrio ecológico. Por sua vez, a adubação verde contribui com o aporte de matéria orgânica, melhora a fertilidade e estimula a diversidade microbiana do solo (Kumar; Sharma, 2020; Souza, 2023).

Essas abordagens integradas constituem pilares de uma agricultura mais sustentável, resiliente e menos dependente de insumos externos. Além de favorecerem a conservação ambiental, essas práticas ampliam a viabilidade econômica dos sistemas produtivos em médio e longo prazo, promovendo a transição para modelos mais equilibrados e socialmente justos (Souza *et al.*, 2025a; Souza *et al.*, 2025b).

6. Práticas de manejo sustentáveis

As práticas de manejo sustentável desempenham papel central na promoção da saúde do solo e na sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Fundamentadas em princípios ecológicos, essas práticas buscam restaurar os serviços ecossistêmicos do solo, aumentar sua resiliência frente às mudanças

climáticas e reduzir a dependência de insumos químicos sintéticos (Altieri, 2018; Souza *et al.*, 2025a).

Dentre essas estratégias, a rotação de culturas se destaca por sua eficácia na melhoria do equilíbrio nutricional do solo, no controle biológico de pragas e doenças e na promoção da diversidade vegetal e microbiana. A alternância planejada de espécies cultivadas ao longo do tempo reduz o esgotamento de nutrientes específicos, promove a ocupação diferenciada do perfil do solo pelas raízes e contribui para o fortalecimento dos mecanismos naturais de regeneração (Lal, 2020; Souza *et al.*, 2024c).

Outra prática de destaque é o uso de culturas de cobertura, semeadas durante o pousio ou nos intervalos entre as safras. Essas espécies contribuem para a adição de matéria orgânica, melhoram a retenção hídrica, reduzem perdas por erosão e auxiliam no controle de plantas daninhas. Além disso, atuam na regulação térmica e hídrica da superfície do solo, criando um microclima mais favorável às culturas comerciais subsequentes (Silva *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2025b).

A adubação verde, especialmente com leguminosas, é uma técnica amplamente difundida por seus benefícios à fertilidade natural do solo e à biodiversidade edáfica (Figura 9).



Figura 9. Adubação verde e nutrição equilibrada no cafezal. Fonte: Lúcio Martins Neto. Disponível em: <https://campoenegocios.com/adubacao-verde-a-nutricao-equilibra-que-seu-cafezal-merece/>.

Por meio da fixação biológica de nitrogênio, essas plantas enriquecem o solo com nutrientes acessíveis e melhoram sua estrutura física, favorecendo a formação de agregados estáveis e a ciclagem de nutrientes. Adicionalmente, contribuem para a redução da erosão e para a diminuição da necessidade de fertilizantes industriais, promovendo ganhos econômicos e ambientais (Calegari, 1995; Silva *et al.*, 2019; Souza, 2023).

A adoção eficaz dessas práticas demanda conhecimento técnico, planejamento agronômico e integração entre agricultores, extensionistas e instituições de pesquisa. O sucesso dos sistemas sustentáveis está diretamente relacionado ao domínio sobre os períodos ideais de plantio, ao manejo correto das espécies utilizadas e às técnicas de consorciamento adaptadas às condições locais (Calegari, 1995; Souza *et al.*, 2025c).

Dessa forma, o manejo sustentável do solo, baseado na rotação de culturas, adubação verde e uso de culturas de cobertura, constitui um conjunto de estratégias sinérgicas que promovem a produtividade agrícola, a conservação ambiental e a viabilidade econômica em longo prazo. Tais práticas são fundamentais para a construção de sistemas produtivos mais resilientes, integrados ao meio ambiente e alinhados com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Souza *et al.*, 2025d).

7. Benefícios da cobertura do solo

A cobertura do solo por meio da adubação verde configura-se como uma das práticas mais eficazes para a conservação e o manejo sustentável dos agroecossistemas. O uso de plantas de cobertura — como leguminosas e gramíneas — oferece múltiplos benefícios agronômicos e ecológicos, promovendo a proteção da superfície do solo, a conservação da umidade, a retenção de nutrientes e o aumento da matéria orgânica (Figura 10). Esses benefícios são fundamentais para o equilíbrio dos processos edáficos e para a construção de sistemas produtivos mais resilientes (Lal, 2020; Brussard *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2025a).

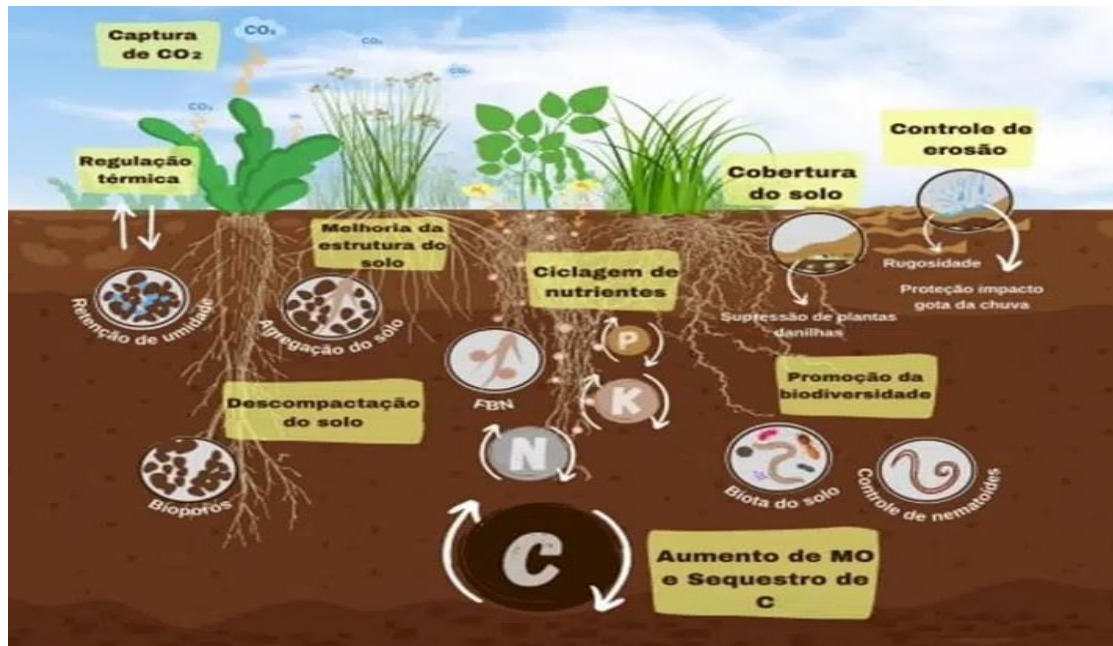


Figura 10. Benefícios fornecidos pela utilização de plantas de cobertura/adubação verde. Fonte: Cherubin, 2022. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-leguminosas-e-adubacao-verde/>.

As plantas de cobertura atuam na redução da evaporação da água, mantendo a umidade do solo por mais tempo, além de protegerem contra a erosão hídrica e eólica. Ao formar uma camada vegetativa sobre o solo, essas espécies diminuem o impacto direto das gotas de chuva, reduzindo o escoamento superficial e a perda de nutrientes por lixiviação. A decomposição da biomassa vegetal enriquecida em carbono contribui para o aumento do teor de matéria orgânica, elemento essencial para a fertilidade, a estrutura e a vida do solo (Silva, 1955; Altieri, 2018; Makhdoom *et al.*, 2021).

Em ambientes tropicais, onde as altas temperaturas e as chuvas intensas aceleram a mineralização e a decomposição da matéria orgânica, o uso de plantas de cobertura é ainda mais estratégico. Nesses contextos, a adubação verde atua como um mecanismo de conservação dos nutrientes e de manutenção da estrutura física e biológica do solo. Essa prática favorece o equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos e melhora atributos como a capacidade de infiltração da água, a agregação das partículas e a atividade microbiana, fundamentais para a resiliência dos sistemas agrícolas frente a distúrbios climáticos (Souza *et al.*, 2024b; Souza *et al.*, 2025b).

Além dos ganhos diretos sobre a produtividade das culturas, a cobertura do solo promove efeitos indiretos altamente positivos sobre a saúde dos agroecossistemas. A presença contínua de cobertura vegetal contribui para a conservação da biodiversidade edáfica, protege os recursos hídricos, reduz a temperatura do solo e limita o crescimento de plantas invasoras. Tais benefícios são essenciais não apenas para a sustentabilidade da produção, mas também para a proteção ambiental em sentido amplo (Pimentel *et al.*, 2020; Lal, 2020; Souza *et al.*, 2025c).

As estratégias de cobertura do solo também têm sido associadas a processos de recuperação ambiental, especialmente em áreas contaminadas por agroquímicos e metais pesados. Estudos recentes demonstram que, quando bem manejadas, plantas utilizadas na adubação verde podem atuar como agentes fitorremediadores, promovendo a absorção, imobilização ou transformação de contaminantes, contribuindo para a reabilitação de solos degradados (Souza *et al.*, 2025d).

Assim, a cobertura do solo por adubação verde deve ser compreendida como uma prática multifuncional e estratégica dentro dos sistemas sustentáveis de produção agrícola. Ela representa uma aliança entre produtividade e conservação ambiental, articulando saúde do solo, economia de insumos, mitigação de impactos ambientais e restauração ecológica.

8. Avaliação da produtividade e qualidade do café

A avaliação da produtividade e da qualidade do café constitui etapa essencial para assegurar a eficiência dos sistemas de produção, a sustentabilidade das práticas agrícolas e a competitividade do produto nos mercados nacional e internacional. A produtividade do cafeeiro, usualmente expressa em sacas por hectare, é condicionada por múltiplos fatores interativos, como as características genéticas da cultivar, as condições edafoclimáticas, o manejo do solo, a adubação, a poda, o controle fitossanitário e as técnicas agronômicas adotadas (Cruz *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2025a).

A implementação de práticas integradas de manejo, aliando adubação balanceada, controle biológico de pragas, práticas conservacionistas e poda adequada, é decisiva para garantir elevados níveis de produtividade com sustentabilidade. Nesse contexto, os sistemas produtivos que incorporam princípios agroecológicos e tecnologias adaptadas às realidades locais promovem maior eficiência agrônômica e menor impacto ambiental (Mendes *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2024c).

A qualidade do café, por sua vez, é um atributo multidimensional e determinante para o valor de mercado do produto. Ela é avaliada com base em parâmetros físicos (uniformidade dos grãos, ausência de defeitos, peneira) e sensoriais (aroma, acidez, corpo, sabor, finalização e balanço), definidos por meio da análise sensorial conduzida por classificadores treinados. A expressão desses atributos está diretamente relacionada às interações entre fatores genéticos, ambientais e ao manejo durante o cultivo, colheita e pós-colheita (Barbosa *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2025b).

Técnicas pós-colheita, como a secagem controlada, a fermentação direcionada e o armazenamento em condições adequadas, são fundamentais para preservar e realçar as qualidades sensoriais dos grãos, principalmente quando o objetivo é produzir cafés especiais (Figura 11). O uso de práticas sustentáveis na lavoura, como a adubação verde com crotalárias, o cultivo consorciado e a cobertura do solo, também tem mostrado efeitos positivos tanto sobre a qualidade quanto sobre a produtividade, ao melhorar a estrutura do solo, a nutrição das plantas e o microclima da lavoura (Silva *et al.*, 2021; Souza, 2023).

A avaliação morfoagronômica do cafeeiro em sistemas alternativos de cultivo — considerando parâmetros como o vigor vegetativo, a sanidade das plantas, o enfolhamento e a conformação da copa — é essencial para validar o desempenho produtivo e a qualidade dos grãos nesses contextos. Além disso, indicadores como índice SPAD², índice de robustez e qualidade sensorial vêm sendo utilizados como ferramentas complementares de monitoramento e tomada de decisão (Mendes *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2025c).

² O índice SPAD (do inglês *Soil Plant Analysis Development*) é uma medida indireta do teor de clorofila nas folhas das plantas, utilizada para estimar o estado nutricional, especialmente em relação ao nitrogênio.



Figura 11. Secagem do café em terreiro suspenso: melhoria da qualidade sensorial dos grãos. Fonte: Acervo Mayra Polastrelli, 2025.

Dessa forma, a avaliação contínua da produtividade e da qualidade do café, aliada à implementação de boas práticas agrícolas, de manejo agroecológico e de inovação tecnológica, constitui uma estratégia central para a construção de sistemas cafeeiros resilientes, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis, em consonância com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (Souza *et al.*, 2025d).

9. Contribuições para a pesquisa e inovação

A pesquisa científica e a inovação tecnológica ocupam um papel central no avanço da agricultura contemporânea, proporcionando soluções para desafios históricos e emergentes e promovendo a sustentabilidade, a eficiência produtiva e a adaptação dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas. No âmbito do melhoramento genético, os avanços em biotecnologia — como a seleção assistida por marcadores moleculares e a edição gênica — têm possibilitado o desenvolvimento de cultivares mais resistentes a doenças, pragas e estresses abióticos, além de promover maior eficiência no uso de recursos como água e nutrientes (Ferreira *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023).

Essas inovações contribuem diretamente para o aumento da produtividade, a estabilidade das lavouras e a melhoria da qualidade sensorial dos produtos

agrícolas, como o café. No contexto da cafeicultura, a utilização de cultivares adaptadas a diferentes altitudes, solos e regimes hídricos tem sido estratégica para a ampliação da produção com sustentabilidade (Souza *et al.*, 2025a).

Paralelamente, as inovações em práticas de manejo sustentável têm impulsionado a transição agroecológica e a agricultura regenerativa. A adoção de técnicas como adubação verde, consorciação de culturas, rotação de espécies, manejo integrado de pragas (MIP), uso de bioinsumos e cobertura do solo tem mostrado impactos positivos na saúde do solo, na redução da dependência de insumos químicos e na melhoria dos serviços ecossistêmicos (Altieri, 2018; Lal, 2020; Silva *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2025b).

A integração dessas práticas com recursos da agricultura de precisão tem revolucionado o setor agrícola, permitindo um gerenciamento mais eficiente e localizado das variáveis do sistema produtivo. Ferramentas como drones, sensores remotos, imagens de satélite, SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e análise de big data possibilitam o monitoramento em tempo real do solo, da vegetação e das condições climáticas (Figura 12). Esses recursos tecnológicos promovem a aplicação racional de insumos, resultando em aumento da produtividade, da qualidade do produto final e na redução dos impactos ambientais (ZHANG *et al.*, 2021; GONÇALVES *et al.*, 2023).



Figura 12. Imagem de drone e sensores remotos na área da cafeicultura do Ifes campus de Alegre. Fonte: Acervo Jéferson Ferrari, 2025.

Na cafeicultura, o uso de microrganismos promotores de crescimento, como bactérias fixadoras de nitrogênio, fungos micorrízicos e actinobactérias, tem se destacado como alternativa promissora para o incremento da eficiência nutricional e a substituição parcial de fertilizantes minerais. Os biofertilizantes à base de microrganismos benéficos, associados à matéria orgânica e à adubação verde, contribuem para a melhoria da estrutura e fertilidade do solo, reforçando o papel dos processos biológicos no manejo agrícola sustentável (Ambrosano, 2009; Oliveira *et al.*, 2022; Souza, 2023).

Além do desenvolvimento tecnológico, a disseminação do conhecimento e a capacitação técnica dos agricultores são pilares fundamentais para a consolidação das inovações no campo. A atuação de programas de extensão rural, cooperativas agropecuárias, escolas familiares agrícolas, e a articulação entre universidades, centros de pesquisa e comunidades rurais têm se mostrado eficazes para promover o acesso à informação e fomentar a inovação social. Essa aproximação entre ciência, tecnologia e prática agrícola é decisivo para construir uma agricultura mais resiliente, participativa e adaptada às realidades locais (Silva *et al.*, 2009; Moraes *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2025c).

Dessa forma, as contribuições da pesquisa e da inovação tecnológica não apenas aprimoram os índices produtivos e qualitativos da agricultura, mas também fortalecem a sustentabilidade ambiental, a soberania alimentar e a viabilidade econômica das propriedades rurais, promovendo a transição para sistemas agrícolas mais equilibrados, justos e regenerativos.

10. Considerações

A agricultura convencional, amplamente difundida nas últimas décadas, foi responsável por expressivos avanços na produtividade agrícola mundial. No entanto, seu modelo produtivista, centrado no uso intensivo de insumos químicos e na homogeneização dos sistemas de cultivo, tem provocado impactos severos nos ecossistemas e comprometido a sustentabilidade em longo prazo. A degradação dos solos, a compactação, a redução da biodiversidade, a dependência crescente de fertilizantes e pesticidas e a contaminação dos

recursos hídricos representam consequências diretas de práticas que desconsideram os limites ecológicos dos sistemas naturais.

As evidências apresentadas ao longo deste trabalho demonstram que a saúde do solo é um elemento-chave para garantir a resiliência dos agroecossistemas e a viabilidade da produção agrícola. A perda de matéria orgânica, a diminuição da atividade biológica e a acidificação decorrente do uso indiscriminado de fertilizantes sintéticos afetam negativamente a estrutura e a fertilidade do solo. Além disso, a mecanização intensiva e o tráfego constante de máquinas pesadas agravam o problema ao reduzir a porosidade e dificultar a penetração radicular, elevando os riscos de erosão e perdas por escoamento superficial.

Diante desse cenário, práticas agroecológicas e de manejo sustentável despontam como caminhos viáveis e necessários para a construção de uma agricultura mais equilibrada, produtiva e ambientalmente responsável. Estratégias como a rotação de culturas, a adubação verde, a cobertura do solo e o uso de bioinsumos oferecem múltiplos benefícios, como a restauração da fertilidade, o aumento da matéria orgânica, a proteção contra erosão e a redução da dependência de insumos químicos. A diversificação dos sistemas produtivos contribui ainda para o fortalecimento da biodiversidade funcional, promovendo maior resiliência frente a pragas, doenças e eventos climáticos extremos.

No contexto específico da cafeicultura, a adoção de práticas sustentáveis associadas ao monitoramento contínuo da produtividade e da qualidade dos grãos é fundamental para assegurar um produto competitivo e ambientalmente compatível com as exigências do mercado atual. Estudos sobre o uso de adubação verde com leguminosas, biofertilizantes e consórcios agroflorestais têm evidenciado ganhos significativos na saúde do solo e na qualidade sensorial do café.

A pesquisa científica e a inovação tecnológica desempenham papel essencial nesse processo de transição. A biotecnologia, a agricultura de precisão e os estudos sobre microbiologia do solo ampliam as possibilidades de manejo eficiente, adaptado às condições locais e orientado para a sustentabilidade. A integração entre conhecimento tradicional, ciência e extensão rural é, portanto,

fundamental para promover a adoção de práticas regenerativas e para fomentar processos de inovação social no campo.

Conclui-se, portanto, que repensar os modelos produtivos, incorporando os princípios da agroecologia e da sustentabilidade, é uma urgência diante dos desafios ambientais, econômicos e sociais do século XXI. A transição para sistemas agrícolas mais resilientes depende da valorização do solo como um organismo vivo e multifuncional, da articulação entre diferentes saberes e da construção de políticas públicas que incentivem a pesquisa, a capacitação técnica e o apoio às experiências exitosas de base agroecológica. Só assim será possível garantir segurança alimentar, conservação dos recursos naturais e justiça socioambiental no meio rural.

11. Referências

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2018.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I.; VAZQUEZ, L. Agroecologia: bases científicas para una agricultura sustentable. **Revista de Agroecologia**, v. 2, n. 3, p. 45-79, 2007.

AMBROSANO, E. J. Biofertilizantes e suas aplicações na agricultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1231-1240, 2009.

BARBOSA, L. A. *et al.* Avaliação da qualidade sensorial do café: métodos e aplicações. **Revista Brasileira de Agricultura**, v. 75, n. 4, p. 350-367, 2020.

BRUSSARD, L. *et al.* Soil biodiversity for agricultural sustainability. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 220, p. 23-28, 2018.

CALEGARI, A. **Adubação verde**: fundamentos e práticas. Jaboticabal: FUNEP, 1995.

CARPENTER, S. R. *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. **Ecological Applications**, v. 8, n. 3, p. 559-568, 2016.

CRUZ, A. P. *et al.* Manejo sustentável do cafeeiro e produtividade: uma revisão. **Ciência Agrônômica**, v. 52, n. 3, p. 345-358, 2021.

FERREIRA, R. A. *et al.* Técnicas de pós-colheita para preservação da qualidade do café. **Revista Brasileira de Pós-Colheita**, v. 16, n. 2, p. 115-130, 2019.

FERREIRA, T. M. *et al.* Aplicações da biotecnologia na agricultura. **Ciência Rural**, v. 51, n. 7, p. e20210010, 2021.

FOWLER, S. J. Soil biodiversity and its role in ecosystem services. **Soil Biology**, v. 12, p. 150-172, 2020.

GOMIERO, T. *et al.* Agroecologia e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Ciência Rural**, v. 41, n. 2, p. 346-355, 2011.

GONÇALVES, J. A. *et al.* Agricultura de precisão: tecnologias emergentes para o manejo sustentável. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 5, p. 389-398, 2023.

JONES, D. Soil compaction and its impact on root growth. **Journal of Soil Science**, v. 70, n. 2, p. 227-234, 2019.

KUMAR, S.; SHARMA, R. Integrated pest management for sustainable agriculture. **Pest Management Science**, v. 76, n. 1, p. 12-24, 2020.

LAL, R. Soil health and sustainable agriculture. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 1019-1027, 2020.

MAKHDOOM, M. A. *et al.* Impact of cover crops on soil health and crop productivity in tropical regions. **Soil Use and Management**, v. 37, n. 3, p. 514-523, 2021.

MALHI, S. S. *et al.* Agroforestry systems and biodiversity conservation. **Forest Ecology and Management**, v. 490, 119098, 2021.

MENDES, F. A. *et al.* Avaliação morfoagronômica e produtiva de cafeeiros em sistemas consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e20220345, 2023.

MORAES, P. F. *et al.* Extensão rural e inovação social na agricultura familiar. **Revista de Desenvolvimento Rural**, v. 18, n. 2, p. 45-62, 2022.

OLIVEIRA, J. F. *et al.* Microrganismos benéficos no manejo do solo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, p. e0210150, 2022.

PHILIPPOT, L. *et al.* Microbial diversity and functions in soil. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 44, p. 173-192, 2013.

PIMENTEL, D. *et al.* Environmental and economic benefits of cover cropping. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 297, 106928, 2020.

POWELL, J. R. *et al.* The effects of monoculture agriculture on soil biodiversity. **Ecological Applications**, v. 30, n. 6, e02115, 2020.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura na preservação da vida**. 6. ed. São Paulo: Nobel, 2002.

SANTOS, R. M. *et al.* Fatores que influenciam a produtividade do café no Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura**, v. 77, n. 1, p. 89-105, 2022.

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N. **Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural**. Beau Bassin, Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2021. 72 p. ISBN 978-620-2-80825-2.

SILVA, R. T. *et al.* Agricultura sustentável e adubação verde. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180143, 2019.

SILVA, V. S. *et al.* Extensão rural e capacitação para inovação social. **Revista Agroecologia**, v. 5, n. 1, p. 12-25, 2009.

SILVA, Y. P. Cobertura do solo e sustentabilidade em sistemas agrícolas tropicais. **Revista Brasileira de Agricultura Tropical**, v. 5, n. 2, p. 100-108, 1955.

SILVA, Z. R. *et al.* Práticas sustentáveis na cafeicultura. **Revista Científica de Agronomia**, v. 14, n. 1, p. 45-60, 2022.

SINGH, B. K. *et al.* Soil biodiversity under conventional and organic farming systems. **Science of the Total Environment**, v. 765, 144317, 2021.

SOUSA, D. S. M. *et al.* Estratégias de recuperação ambiental em solos contaminados por agroquímicos e metais pesados: técnicas de engenharia e fitorremediação. In: SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas, Vol. X**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 140-162. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3.c4>.

SOUZA, E. L. de S. *et al.* Desafios e perspectivas da agroecologia para alcançar a realização dos objetivos do desenvolvimento sustentável. In: SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas, Vol. IX**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 45-69. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-33-6.c1>.

SOUZA, I. I. de M. *et al.* Aspectos fundamentais da transição agroecológica. In: SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em gestão ambiental, Vol. I**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2024. p. 130-165. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-22-0.c4>.

SOUZA, J. L. de. **Bokashi orgânico: o que é, como preparar e como aplicar**. Cursos CPT, 2023.

SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em gestão ambiental, Vol. III**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2024. 311 p. ISBN 978-65-84548-27-5. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-27-5>.

SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas, Vol. X**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 44-67. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3>.

SOUZA, M. N.; MAGALHÃES, M. V. D. de; LOPES, L. B.; AMARAL, A. A. do; MUNIZ, F.; PANCOTTO, T. A. Transição sustentável: caminhos para a construção de sistemas produtivos resilientes. In: SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos**

em recuperação de áreas degradadas, Vol. X. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 68-111. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3.c2>.

SOUZA, M. N.; NASCIMENTO, L. M.; BIGHI, A. R.; FIM, B. P.; PIMENTA, C. D.; CARVALHO, R. C. B.; PINTO, G. P.; SARAIVA, U.; MASSARIOL, B. P.; MORELI, R. C.; AMARAL, A. A. do. Recuperação de áreas degradadas: fundamentos e objetivos da reabilitação ambiental. In: SOUZA, M. N. (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas, Vol. X.** Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 44-67. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-34-3.c1>.

WANG, Y. et al. Advances in molecular breeding and genome editing for crop improvement. **Trends in Plant Science**, v. 28, n. 4, p. 358-372, 2023.

ZHANG, X. et al. Application of big data in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 185, p. 106125, 2021.