

ETEC CARMELINO CORREIA JUNIOR

CURSO TEC CAFEICULTURA

LEUER MORANDI PONCE

WESLEY OLIVEIRA

**IMPACTOS DOS SISTEMAS AGROFLORESTAIS NA
FERTILIDADE DO SOLO EM CAFEZAIS**

FRANCA -SP

2026

LEUER MORANDI PONCE

WESLEY OLIVEIRA

**IMPACTOS DOS SISTEMAS AGROFLORESTAIS NA
FERTILIDADE DO SOLO EM CAFEZAIS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado as Curso Técnico em cafeicultura da
ETEC Carmelino Corrêa Jr., orientado pelo prof.
Clayson Correa de Sousa, como requisito parcial
obtenção do título de Técnico em Cafeicultura.

FRANCA-SP

2026

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização da Cafeicultura Mundial e Brasileira	1
1.2 Importância Econômica, Social e Ambiental do Café	2
1.3 Problemas Associados aos Sistemas Convencionais de Cultivo....	4
1.4 Conceito e Importância dos Sistemas Agroflorestais.....	5
1.5 Relação entre Sistemas Agroflorestais e Qualidade do Solo.....	7
1.6 Justificativa Científica e Social	8
1.7 Problema de Pesquisa e Hipótese	10
1.8 Objetivos	10
2 – REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Cafeicultura Brasileira	12
2.2 Sistemas Convencionais de Produção de Café.....	15
2.3 Sistemas Agroflorestais (SAFs).....	17
2.4 Fertilidade do Solo	21
2.5 Atributos Químicos do Solo em Sistemas Agroflorestais com Cafeeiro	24
2.6 Atributos Físicos do Solo em Sistemas Agroflorestais com Cafeeiro	27

Cafeeiro.....	31
2.7.1 Biomassa Microbiana.....	31
2.7.2 Atividade Enzimática.....	31
2.7.3 Fauna Edáfica	32
2.7.4 Ciclagem de Nutrientes.....	33
2.8.1 Conservação do Solo.....	34
2.8.2 Sequestro de Carbono	34
2.8.3 Adaptação Climática	35
2.8.4 Biodiversidade.....	36
2.8.5 Produtividade dos Cafezais.....	37
3 – METODOLOGIA.....	38
3.1 Tipo e Natureza da Pesquisa	38
3.2 Método de Abordagem.....	38
3.3 Procedimentos Metodológicos	39
3.4 Estratégias de Busca	39
3.5 Critérios de Inclusão e Exclusão	40
3.6 Período de Publicação Analisado	40
3.7 Forma de Análise dos Resultados	41
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.2 Atributos Físicos: Evidências Comparativas na Literatura	44

4.3 Atributos Biológicos: Biomassa Microbiana, Enzimas e Fauna Edáfica.....	45
4.4 Ciclagem de Nutrientes e Estoques de Carbono.....	47
4.5 Conservação do Solo e Prevenção da Erosão	48
4.6 Produtividade dos Cafezais: Convergências e Divergências.....	48
5 – CONCLUSÕES.....	51
5.1 Síntese dos Resultados	51
5.2 Resposta ao Problema de Pesquisa e Confirmação da Hipótese ..	52
5.3 Contribuições Científicas	53
5.4 Limitações do Estudo	53
5.5 Recomendações para Futuras Pesquisas.....	54
6. REFERÊNCIAS	55

RESUMO

A cafeicultura brasileira ocupa posição de destaque no cenário agrícola mundial, sendo o Brasil o maior produtor e exportador de café. Contudo, o modelo convencional de cultivo em monocultura, predominante na maior parte das lavouras, tem gerado impactos negativos sobre a qualidade do solo, incluindo redução da matéria orgânica, compactação, diminuição da biodiversidade microbiana e maior suscetibilidade à erosão. Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) emergem como alternativa sustentável, integrando espécies arbóreas ao cultivo do cafeeiro e promovendo a recuperação e manutenção da fertilidade do solo por meio de múltiplos mecanismos ecológicos. O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica com o objetivo de analisar os impactos dos sistemas agroflorestais sobre os atributos químicos, físicos e biológicos do solo em cafezais, em comparação aos sistemas convencionais de cultivo. A pesquisa foi realizada por meio de levantamento bibliográfico nas principais bases de dados científicos, com ênfase em estudos conduzidos em regiões cafeeiras brasileiras, especialmente Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo e Bahia. Os resultados demonstram que os SAFs promovem significativa melhoria nos atributos de fertilidade do solo, com aumento dos teores de matéria orgânica, melhoria do pH, elevação da capacidade de troca catiônica (CTC), incremento da biomassa microbiana e da atividade enzimática, além de maior estabilidade de agregados e redução da densidade aparente do solo. A ciclagem de nutrientes é intensificada pela decomposição da serapilheira produzida pelas espécies arbóreas, criando um ciclo virtuoso de reposição de nutrientes sem a necessidade de elevados aportes de fertilizantes minerais. A hipótese central do

trabalho, de que os SAFs exercem impactos positivos e mensuráveis sobre a fertilidade do solo em cafezais, é confirmada pela literatura analisada, com variações entre espécies arbóreas utilizadas, tipo de solo e condições climáticas regionais. Conclui-se que a adoção de sistemas agroflorestais representa uma estratégia tecnicamente fundamentada e ambientalmente relevante para a sustentabilidade da cafeicultura brasileira, contribuindo para a conservação do solo, o sequestro de carbono, a adaptação climática e a manutenção ou incremento da produtividade.

Palavras-chave: Sistemas Agroflorestais. Cafeicultura. Fertilidade do Solo. Matéria Orgânica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Brazilian coffee cultivation holds a prominent position in the global agricultural scenario, with Brazil being the largest producer and exporter of coffee. However, the conventional monoculture model, predominant in most coffee farms, has generated negative impacts on soil quality, including reduction in organic matter, compaction, decrease in microbial biodiversity, and greater susceptibility to erosion. Agroforestry Systems (AFS) emerge as a sustainable alternative, integrating tree species into coffee cultivation and promoting the recovery and maintenance of soil fertility through multiple ecological mechanisms. This study consists of a bibliographic review aimed at analyzing the impacts of agroforestry systems on the chemical, physical, and biological attributes of soil in coffee plantations, compared to conventional cultivation systems. The research was conducted through a bibliographic survey in the main scientific databases, with emphasis on studies conducted in Brazilian coffeegrowing regions, especially Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, and Bahia. The results demonstrate that AFS significantly improve soil fertility attributes, increasing organic matter content, improving pH, raising cation exchange capacity (CEC), increasing microbial biomass and enzyme activity, in addition to greater aggregate stability and reduction in apparent soil density. Nutrient cycling is intensified by the decomposition of litter produced by tree species, creating a virtuous cycle of nutrient replenishment without the need for high mineral fertilizer inputs. The central hypothesis of the study, that AFS have positive and measurable impacts on soil fertility in coffee plantations, is confirmed by the analyzed literature, with variations related to tree species used, soil type,

and regional climatic conditions. It is concluded that the adoption of agroforestry systems represents a technically grounded and environmentally relevant strategy for the sustainability of Brazilian coffee farming.

Keywords: Agroforestry Systems. Coffee farming. Soil fertility. Organic Matter. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da Cafeicultura Mundial e Brasileira

O café (*Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) ocupa lugar de destaque entre as commodities agrícolas mais comercializadas no mundo, sendo superado apenas pelo petróleo em volume de negociações no mercado internacional (TEIXEIRA, 2020). A bebida é uma das mais apreciadas mundialmente, com consumo estimado de cerca de 150 milhões de sacas de 60 kg por ano, segundo dados da Organização Internacional do Café (OIC, 2023). O Brasil, cuja história está intrinsecamente ligada à produção cafeeira desde o século XVIII, consolidou-se ao longo dos séculos como o maior produtor e exportador mundial da commodity, posição que mantém de forma ininterrupta há mais de 150 anos.

No contexto da cafeicultura nacional, os dados são expressivos. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a produção brasileira de café atingiu, na safra 2023/24, aproximadamente 54,8 milhões de sacas de 60 kg, distribuídos entre as espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora* (conilon e robusta), com projeções de expansão para as safras subsequentes. A área total cultivada com café no Brasil é de aproximadamente 2,33 milhões de

hectares, envolvendo cerca de 300 mil produtores rurais e a atividade está presente em 1.983 municípios, distribuídos em 17 estados brasileiros (CONAB, 2024; CNC, 2025).

Do ponto de vista econômico, a cafeicultura gera mais de 8 milhões de empregos diretos e indiretos ao longo de toda a cadeia produtiva, constituindo-se na atividade do agronegócio que mais emprega no país (EMBRAPA CAFÉ, 2021). Em 2023, o Brasil exportou aproximadamente 43 milhões de sacas de 60 kg, o que representou uma receita superior a US\$ 8,5 bilhões, conforme levantamento da Associação Brasileira das Indústrias de Café (ABIC, 2024) e dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC). O Valor Bruto da Produção (VBP) do café brasileiro atingiu R\$114,86 bilhões em 2025, o maior patamar já registrado, consolidando a cafeicultura entre as lavouras de maior relevância econômica nacional (EMBRAPA CAFÉ, 2025).

As principais regiões produtoras de café no Brasil são concentradas nos estados de Minas Gerais (que responde por aproximadamente 50% da produção nacional de arábica), Espírito Santo (principal produtor de conilon), São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná e Goiás. Nessas regiões, destacam-se os polos do Sul de Minas Gerais, Cerrado Mineiro, Zona da Mata Mineira, Mogiana Paulista, Conilon Capixaba e Chapada Diamantina Baiana, cada qual com características edafoclimáticas, variedades e sistemas de produção distintos (CONAB, 2024; FIESP, 2022).

1.2 Importância Econômica, Social e Ambiental do Café

Além da dimensão econômica, o café desempenha papel fundamental nas esferas social e ambiental das regiões produtoras. Do ponto de vista social, a cafeicultura sustenta centenas de milhares de propriedades rurais, com

predominância de pequenas e médias propriedades familiares, sendo a atividade agrícola de maior capilaridade social no país (CNC, 2025). De acordo com dados da FIESP (2022), a cadeia produtiva do café gera cerca de 585 mil empregos diretos, considerando campo, indústria e comércio, enquanto estimativas mais amplas da Embrapa e do Conselho Nacional do Café apontam para mais de 8 milhões de postos de trabalho diretos e indiretos.

O impacto social da cafeicultura ultrapassa os aspectos puramente econômicos. Em Minas Gerais, maior estado produtor, mais de 600 dos 853 municípios têm a cafeicultura como principal atividade econômica, sendo a atividade responsável por dinamizar toda a economia regional, desde a produção de insumos até o comércio varejista nas pequenas cidades (FAEMG, 2020). A presença do café na agricultura familiar é igualmente expressiva: o último Censo Agropecuário do IBGE registrou mais de 40 mil estabelecimentos dirigidos por mulheres na cafeicultura, correspondendo a 13,2% dos empreendimentos do setor (IBGE, 2017).

No âmbito ambiental, a cafeicultura apresenta uma relação ambivalente com os ecossistemas naturais. Historicamente, a expansão das lavouras cafeeiras esteve associada ao desmatamento de áreas de Mata Atlântica, Cerrado e, mais recentemente, de outros biomas. Por outro lado, a cafeicultura praticada de forma sustentável, especialmente por meio de sistemas agroflorestais e do cultivo sombreado, pode atuar como importante instrumento de conservação da biodiversidade, proteção do solo, regulação do ciclo hidrológico e sequestro de carbono (SOUZA et al., 2020; MARTINEZ et al, 2024).

1.3 Problemas Associados aos Sistemas Convencionais de Cultivo

O modelo convencional de produção de café, baseado na monocultura a pleno sol com elevado uso de insumos químicos, consolidou-se no Brasil a partir da segunda metade do século XX, impulsionado pelas políticas de modernização agrícola da Revolução Verde. Esse modelo, embora tenha propiciado incrementos significativos na produtividade, gerou impactos ambientais negativos de diversas ordens, com destaque para a degradação dos atributos do solo (PACHECO et al., 2020; ECOCERT, 2022).

Durante boa parte do século XX, os produtores foram incentivados a derrubar as árvores de sombreamento para cultivar café a pleno sol, com o argumento de que a luz direta aumentaria a produtividade. Como consequência, além do desmatamento, pássaros e morcegos que se alimentavam de insetos pragas perderam seus habitats naturais, levando ao aumento do uso de pesticidas. Paralelamente, a ausência de cobertura vegetal intensificou a erosão do solo, a perda de biodiversidade e o comprometimento da fertilidade natural das lavouras (ECOCERT, 2022).

O uso intensivo de insumos químicos, como fertilizantes sintéticos e agrotóxicos, frequentemente resulta na degradação da estrutura do solo e na diminuição da biodiversidade microbiana, comprometendo a capacidade do solo de sustentar cultivos saudáveis a longo prazo (BRAZ et al., 2024). A aplicação contínua de herbicidas e fungicidas cúpricos, por exemplo, é reconhecidamente prejudicial à macrofauna edáfica, especialmente às minhocas, com efeitos negativos sobre a infiltração de água e as taxas de mineralização do carbono (MARTINEZ et al., 2024). Segundo Pacheco et al. (2020), a erosão laminar ocasionada pelo revolvimento excessivo do solo e pela ausência de cobertura

vegetal nas entrelinhas retira nutrientes essenciais como fósforo e potássio, comprometendo a fertilidade natural ao longo do tempo.

A monocultura cafeeira a pleno sol é igualmente identificada como responsável pela redução dos estoques de matéria orgânica do solo (MOS), pela compactação superficial causada pelo tráfego de maquinário, pela perda da estabilidade dos agregados e pela redução da capacidade de infiltração hídrica. Esses processos são interdependentes e, em conjunto, reduzem a adaptação do sistema produtivo frente às adversidades climáticas, como veranicos e períodos de seca extrema, que têm se intensificado nas regiões cafeeiras brasileiras em razão das mudanças climáticas globais (SOUZA et al., 2020; CONAB, 2024).

1.4 Conceito e Importância dos Sistemas Agroflorestais

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) são definidos pelo Centro Mundial de Agrofloresta (ICRAF) como sistemas de manejo de recursos naturais, dinâmicos e baseados na ecologia, por meio da integração de árvores na propriedade e na paisagem agrícola, diversificando e sustentando a produção com maiores benefícios sociais, econômicos e ambientais para todos os usuários do solo, em diferentes escalas espaciais e temporais (ICRAF, 2015). Em termos práticos, os SAFs correspondem a uma forma de uso da terra em que espécies lenhosas — árvores, arbustos e palmeiras — são cultivadas em associação com cultivos agrícolas ou criações animais, na mesma área, de maneira simultânea ou em sequência temporal (SOUZA, 2022).

Longe de ser uma técnica agrícola recente, os sistemas agroflorestais representam uma das mais antigas formas de uso da terra, praticadas há

milênios por populações tradicionais e agricultores familiares em todo o mundo, e continuam sendo amplamente utilizados em diversas regiões tropicais. Ao mesmo tempo, são considerados sistemas modernos por sua adequação ao ideal de desenvolvimento sustentável, ao integrar a dimensão produtiva com a conservação ambiental e os serviços ecossistêmicos (EMBRAPA, 2015; SOUZA, 2022).

No contexto da cafeicultura brasileira, os SAFs têm sido identificados como importantes estratégias de transição agroecológica, capazes de conciliar a produção cafeeira com a restauração ecológica e a melhoria das condições edáficas. Pesquisas desenvolvidas em diversas regiões produtoras do Brasil, como Sul de Minas Gerais, Zona da Mata Mineira, Espírito Santo e Bahia, documentam os benefícios dos SAFs sobre a qualidade do solo, a produtividade das lavouras e a qualidade sensorial da bebida (SALGADO et al., 2008; SOUZA et al., 2020; SOUZA, 2022). Segundo Souza et al. (2020), em estudo realizado na região do Caparaó (ES/MG), a técnica de associar árvores com o cafeeiro promoveu melhoria significativa na qualidade sensorial da bebida, quando comparado ao cultivo a pleno sol, indicando que os benefícios dos SAFs extrapolam a esfera puramente agrônômica.

A FAO (2015) recomenda a adoção de sistemas agroflorestais como estratégia prioritária para adaptação às mudanças climáticas, mitigação de impactos ambientais e desenvolvimento sustentável da agricultura tropical. Essa recomendação encontra respaldo em numerosas evidências científicas que demonstram a capacidade dos SAFs em promover múltiplos serviços ecossistêmicos, como proteção do solo contra a erosão, conservação da água,

manutenção do microclima, atração de polinizadores, fixação de nitrogênio atmosférico e sequestro de carbono (FAO, 2015; EPAGRI, 2024).

1.5 Relação entre Sistemas Agroflorestais e Qualidade do Solo

A relação entre sistemas agroflorestais e a qualidade do solo é mediada por uma série de processos ecológicos interdependentes. O componente arbóreo dos SAFs contribui para a melhoria dos atributos edáficos por diferentes vias, sendo a principal delas a produção e decomposição da serapilheira — conjunto de folhas, ramos, cascas e frutos depositados sobre a superfície do solo pelas espécies arbóreas. A decomposição desta biomassa por organismos decompositores aumenta o teor de matéria orgânica do solo (MOS), eleva a disponibilidade de nutrientes, melhora a estrutura física e estimula a atividade microbiana (YOUNG, 1997; EMBRAPA CERRADO, 2015).

Segundo Young (1997), os SAFs aumentam a qualidade física do solo pela manutenção da matéria orgânica, protegem a superfície do solo contra o impacto direto das chuvas, reduzem o escoamento superficial, melhoram a infiltração de água, são capazes de reciclar nutrientes de horizontes mais profundos para a superfície, e geram condições favoráveis para a fauna e a microbiota edáfica. Estes efeitos resultam em solos com maior estabilidade de agregados, menor densidade aparente, maior capacidade de retenção de água e maior adaptação climática, atributos fundamentais para a sustentabilidade dos cafezais, especialmente em contextos de irregularidade pluviométrica.

Na dimensão química, os SAFs promovem incrementos nos teores de carbono orgânico, nitrogênio total, fósforo disponível e bases trocáveis (cálcio, magnésio e potássio), além da melhoria do pH e da capacidade de troca catiônica

(CTC). Estudos realizados em sistemas agroflorestais com cafeeiro em Lavras MG demonstraram que solos sob SAFs com ingazeiro (*Inga vera*) e grevilea (*Grevillea robusta*) apresentaram valores significativamente superiores de matéria orgânica e pH nas camadas superficiais, em comparação a lavouras de café a pleno sol (SALGADO et al., 2008). Na dimensão biológica, a maior diversidade e quantidade de material orgânico nos SAFs favorece a biomassa microbiana, a atividade enzimática e a diversidade da macrofauna edáfica, criando condições favoráveis para a ciclagem de nutrientes e a saúde do ecossistema solo (BASTOS et al., 2023; SOUZA et al., 2023).

A diversidade de espécies arbóreas nos SAFs também favorece a formação de microclimates sombreados que reduzem a temperatura do solo, diminuem a evapotranspiração e atenuam as flutuações térmicas extremas, criando condições mais estáveis para a atividade microbiana e para o próprio desenvolvimento das raízes do cafeeiro (MARTINEZ et al., 2024; SOUZA et al., 2023). Em conjunto, estes mecanismos explicam por que solos sob sistemas agroflorestais tendem a apresentar maior fertilidade, maior atividade biológica e maior estoque de carbono do que solos sob monocultura convencional, mesmo quando comparados a solos com histórico de uso agrícola similar.

1.6 Justificativa Científica e Social

A crescente preocupação com a degradação dos solos agrícolas e com os impactos das mudanças climáticas sobre a produção de alimentos confere relevância científica e social ao estudo dos sistemas agroflorestais como alternativa sustentável para a cafeicultura. No Brasil, onde o café representa um

dos mais importantes produtos do agronegócio, com reflexos diretos sobre o emprego, a renda e a balança comercial, torna-se imperativo avançar no entendimento dos impactos dos SAFs sobre a fertilidade do solo, a fim de embasar políticas públicas, programas de extensão rural e práticas de manejo mais sustentáveis.

Do ponto de vista científico, embora o número de publicações sobre SAFs em cafezais tenha crescido substancialmente nas últimas duas décadas, ainda persistem lacunas importantes no que se refere à caracterização integrada dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo sob diferentes arranjos agroflorestais, em distintas regiões produtoras e sob diferentes condições pedológicas. A ausência de sínteses bibliográficas abrangentes e atualizadas que cubram os três grupos de atributos do solo de forma integrada, com ênfase na realidade brasileira, justifica a realização do presente trabalho.

Socialmente, a transição de sistemas convencionais para sistemas agroflorestais representa uma oportunidade de inclusão de pequenos e médios produtores em mercados diferenciados de café sustentável, com possibilidade de obtenção de melhores preços por meio de certificações agroecológicas, além de benefícios relacionados à segurança alimentar, diversificação produtiva e fortalecimento da adaptação dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas. Dados de 2022 apontam que a produção de café agroflorestal alcançou receita média de R\$ 7 mil por hectare/ano, valor dez vezes superior à pecuária predatória em algumas regiões (IDESAM, 2023), indicando o potencial econômico dos SAFs para a transformação dos sistemas produtivos rurais.

1.7 Problema de Pesquisa e Hipótese

Diante do contexto apresentado, este trabalho orienta-se pelo seguinte problema de pesquisa: Como os sistemas agroflorestais influenciam os atributos químicos, físicos e biológicos do solo em cafezais, quando comparados aos sistemas convencionais de cultivo?

A hipótese central do presente trabalho é a de que os sistemas agroflorestais promovem impactos positivos e mensuráveis sobre os atributos de fertilidade do solo em cafezais, elevando os teores de matéria orgânica, melhorando os atributos físicos do solo — como estabilidade de agregados, porosidade e infiltração hídrica —, e incrementando os atributos biológicos, especialmente a biomassa microbiana, a atividade enzimática e a diversidade da fauna edáfica, em comparação aos sistemas convencionais de monocultura a pleno sol.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo Geral

Analisar os impactos dos sistemas agroflorestais na fertilidade do solo em cafezais, avaliando seus efeitos sobre os atributos químicos, físicos e biológicos do solo em comparação aos sistemas convencionais de produção.

1.8.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar os sistemas agroflorestais aplicados à cafeicultura;
- b) Avaliar os efeitos dos sistemas agroflorestais sobre os atributos químicos do solo;

- c) Analisar as alterações nos atributos físicos do solo promovidas pelos sistemas agroflorestais;
- d) Investigar a influência dos sistemas agroflorestais sobre os
- e) atributos biológicos do solo;
- f) Comparar os indicadores de fertilidade do solo entre sistemas agroflorestais e sistemas convencionais de cultivo do café;
- g) Discutir os benefícios ambientais e produtivos dos sistemas agroflorestais para a sustentabilidade da cafeicultura.

2 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cafeicultura Brasileira

2.1.1 Histórico

O café (*Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner) tem origem nos planaltos da Etiópia, de onde foi levado para a Península Arábica no século XV, expandindo-se posteriormente para a Europa e as Américas. No Brasil, as primeiras mudas chegaram ao estado do Pará em 1727, trazidas pelo sargento-mor Francisco de Melo Palheta da Guiana Francesa. Do Pará, a cultura expandiu-se gradativamente para o Maranhão, Bahia e, por fim, para o Rio de Janeiro, onde encontrou condições climáticas favoráveis e impulsionou seu cultivo em escala comercial a partir do final do século XVIII (IAC, 1998; FAUSTO, 2002).

O ciclo do café brasileiro teve início no final do século XVIII e perdurou como principal atividade econômica nacional até a crise de 1929. Durante esse período, o café transformou radicalmente a economia e a sociedade brasileiras, financiando a industrialização, impulsionando a construção de ferrovias, promovendo a imigração europeia e constituindo a base do surgimento de

idades no interior dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo (CNC, 2025; FAUSTO, 2002). Em 1880, o Brasil já era o maior produtor mundial de café, posição que mantém de forma ininterrupta até os dias atuais (CNC, 2025).

A história da cafeicultura no Brasil é marcada por sucessivas expansões para novos territórios, impulsionadas pelo esgotamento das terras cultivadas. Do Vale do Paraíba, a produção migrou para o Oeste Paulista, o Sul de Minas Gerais, o Espírito Santo e o Norte do Paraná. Cada nova fronteira foi acompanhada pela abertura de novas áreas, muitas vezes com supressão de vegetação nativa, o que gerou passivos ambientais significativos, especialmente nas regiões da Mata Atlântica, do Cerrado e da Floresta Estacional Semidecidual. A partir da segunda metade do século XX, com a modernização agrícola promovida pelos programas da Revolução Verde, o modelo de cultivo passou a ser predominantemente a monocultura a pleno sol, com uso intensivo de insumos químicos e mecanização (FAUSTO, 2002; CONAB, 2024).

2.1.2 Principais Regiões Produtoras

A cafeicultura brasileira distribui-se por 17 estados, com destaque para Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia e Paraná. Minas Gerais é o maior produtor nacional, respondendo por cerca de 50% da produção de café arábica, com os seguintes polos produtivos: Sul de Minas, Cerrado Mineiro, Zona da Mata e Chapada de Minas (CONAB, 2024). O Sul de Minas Gerais é reconhecido mundialmente pela qualidade de seus cafés especiais, cultivados em altitudes que variam de 800 à 1.300 metros, com temperaturas amenas e regime hídrico bem definido, características que favorecem a formação de grãos densos e bebidas de alta qualidade (ABIC, 2024).

O Cerrado Mineiro, localizado na porção noroeste do estado, é reconhecido como a primeira Indicação Geográfica (IG) do café brasileiro, destacando-se pela uniformidade climática proporcionada pela alternância de estações secas e chuvosas bem definidas, que favorece a maturação homogênea dos frutos e a mecanização da colheita. O Espírito Santo é o maior produtor de café conilon (*Coffea canephora*) do país, sendo responsável por cerca de 70% da produção nacional desta espécie, especialmente nas regiões do Caparaó, Serrana e Norte do estado. A Bahia, especialmente a região da Chapada Diamantina, tem se destacado como polo de cafés de qualidade, com produção expressiva de arábica em altitudes elevadas (CONAB, 2024; ABIC, 2024).

2.1.3 Importância Econômica

A cafeicultura possui relevância econômica de primeira ordem para o Brasil. O Valor Bruto da Produção (VBP) dos cafés brasileiros atingiu R\$114,86 bilhões em 2025, o maior patamar já registrado, consolidando o setor entre as lavouras de maior contribuição econômica nacional (EMBRAPA CAFÉ, 2025). Em 2024, a produção brasileira foi estimada em cerca de 54,8 milhões de sacas de 60 kg, com perspectivas de crescimento para os anos subsequentes (CONAB, 2024). O Brasil exportou em 2023/2024 um volume recorde de 47,3 milhões de sacas, gerando divisas de US\$8,5 bilhões (ABIC, 2024; MDIC, 2024).

A cadeia produtiva do café gera mais de 8 milhões de empregos diretos e indiretos, abrangendo desde a produção agrícola até o varejo e a exportação, sendo reconhecida como a atividade do agronegócio brasileiro de maior capilaridade social e territorial (CNC, 2025; EMBRAPA CAFÉ, 2021). A

cafeicultura está presente em 1.983 municípios distribuídos em 17 estados, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento local e regional e para a manutenção das populações rurais no campo (CONAB, 2024).

2.2 Sistemas Convencionais de Produção de Café

2.2.1 Características

O sistema convencional de cultivo de café, também denominado monocultura a pleno sol, caracteriza-se pela ausência de espécies arbóreas de sombreamento, pelo uso intensivo de fertilizantes minerais, defensivos agrícolas (herbicidas, fungicidas e inseticidas) e pela mecanização das operações culturais. Este modelo foi amplamente difundido no Brasil a partir das políticas de modernização agrícola das décadas de 1960 e 1970, fundamentadas nos princípios da Revolução Verde, que preconizavam o aumento de produtividade mediante o uso intensivo de insumos externos (MARTINEZ et al., 2024; PACHECO et al., 2020).

No sistema convencional, as lavouras são implantadas com altas densidades populacionais (geralmente entre 2.500 e 10.000 plantas por hectare), sob plena exposição solar, com irrigação nos períodos secos e manejo mecanizado do solo entre as linhas de cultivo. O manejo nutricional é baseado em recomendações de adubação química, com aplicações de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, complementados por micronutrientes conforme análise de solo (CONAB, 2024; EMBRAPA CAFÉ, 2021).

2.2.2 Vantagens

O sistema convencional apresenta vantagens operacionais e produtivas bem documentadas. A ausência de sombreamento permite maior uniformidade na maturação dos frutos e facilita a mecanização da colheita, reduzindo custos operacionais. A alta densidade de plantio e o uso de variedades melhoradas geneticamente para produtividade em plena exposição solar permitem alcançar produtividades superiores a 40 sacas por hectare em condições climáticas favoráveis, especialmente nos ciclos bianuais positivos do café arábica (MARTINEZ et al., 2024). Além disso, a ausência de árvores facilita o controle fitossanitário e a movimentação de máquinas entre as linhas de cultivo.

2.2.3 Limitações Ambientais

Entretanto, as limitações ambientais do sistema convencional são amplamente documentadas pela literatura científica. O uso intensivo de insumos químicos resulta na degradação dos atributos do solo, incluindo redução da matéria orgânica, compactação superficial, queda da biodiversidade microbiana e maior vulnerabilidade à erosão (PACHECO et al., 2020; BRAZ et al., 2024). Segundo Pacheco et al. (2020), a produção agrícola convencional no Brasil vem degradando seus recursos edáficos e hídricos, com perda de fertilidade natural pela exportação contínua de nutrientes e pela ausência de reposição orgânica.

A prática da monocultura na cafeicultura convencional leva à redução da diversidade de habitats e à diminuição da fauna auxiliar, especialmente aves insetívoras e morcegos, que naturalmente controlam populações de pragas. Com a perda desses controladores biológicos, aumenta a dependência de pesticidas,

gerando um ciclo de retroalimentação negativa sobre a biodiversidade e a saúde do solo (ECOCERT, 2022; MARTINEZ et al., 2024). O uso contínuo de herbicidas e fungicidas cúpricos é reconhecidamente prejudicial à macrofauna edáfica, especialmente às minhocas e enquitreídeos, com impactos negativos sobre a infiltração de água e a mineralização do carbono orgânico (MARTINEZ et al., 2024).

A ausência de cobertura vegetal permanente nas entrelinhas e a mecanização intensiva aumentam a suscetibilidade do solo à erosão hídrica e eólica, resultando em perda de nutrientes como fósforo e potássio pela enxurrada. A compactação do solo pelo tráfego de máquinas reduz a macroporosidade e a condutividade hidráulica, comprometendo a disponibilidade de água para as plantas nos períodos de déficit hídrico — situação que se agrava com o aumento da frequência de eventos climáticos extremos nas regiões cafeeiras brasileiras (PACHECO et al., 2020; CONAB, 2024).

2.3 Sistemas Agroflorestais (SAFs)

2.3.1 Conceitos

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) são definidos pelo World Agroforestry Centre (ICRAF) como sistemas de gestão dinâmica de recursos naturais, baseados na ecologia, por meio dos quais a integração de árvores na propriedade e na paisagem agrícola diversifica e sustenta a produção com maiores benefícios sociais, econômicos e ambientais para os usuários do solo, em diferentes escalas (ICRAF, 2015). No contexto brasileiro, a Embrapa define os SAFs como formas de uso da terra em que espécies lenhosas — árvores, arbustos e palmeiras — são cultivadas em associação deliberada com cultivos

agrícolas ou criações animais, numa mesma área, de maneira simultânea ou em sequência temporal, havendo interações ecológicas e econômicas entre os diferentes componentes (EMBRAPA, 2015).

O conceito de sistemas agroflorestais sintetiza elementos da ecologia florestal, da agronomia e da ciência do solo, reconhecendo que a integração de componentes arbóreos em sistemas de produção agrícola cria sinergias positivas que transcendem a simples soma dos componentes individuais. Esses sistemas replicam, em maior ou menor grau, a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas florestais naturais, gerando condições para a expressão de processos ecológicos que são suprimidos nas monoculturas convencionais, como a ciclagem de nutrientes via serapilheira, a regulação microclimática e a formação de nicho ecológico para a biodiversidade edáfica (YOUNG, 1997; SOUZA, 2022; FELIPE et al., 2023).

2.3.2 Classificação

Os SAFs são classificados segundo diferentes critérios, incluindo a estrutura, a função e o arranjo espaço-temporal dos componentes. Quanto à estrutura, são reconhecidas três categorias principais: (a) sistemas agrossilviculturais, que associam cultivos agrícolas anuais ou perenes com espécies arbóreas; (b) sistemas silvipastoris, que integram árvores, pastagens e criação de animais; e (c) sistemas agrossilvipastoris, que combinam cultivos agrícolas, árvores e animais numa mesma área (EMBRAPA, 2015; SOUZA, 2022).

Na cafeicultura, os SAFs mais comuns são do tipo agrossilvicultural, onde o cafeeiro é consorciado com espécies arbóreas de serviço (para sombreamento, ciclagem de nutrientes e proteção) e/ou espécies arbóreas

produtivas (para madeira, fruticultura, serviços ambientais com retorno econômico). As espécies arbóreas mais frequentemente utilizadas em associação com o cafeeiro no Brasil incluem o ingazeiro (*Inga vera* Willd.), a grevilea (*Grevillea robusta* A. Cunn.), a bananeira (*Musa* spp.), o abacateiro (*Persea americana* Mill.), a araucária (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze) e o vinhático (*Plathymentia reticulata* Benth.), entre outras (SALGADO et al., 2008; MELLONI et al., 2018; SOUZA, 2022).

2.3.3 Funcionamento Ecológico

O funcionamento ecológico dos SAFs baseia-se nas interações entre os componentes arbóreos, as culturas agrícolas, o solo, a água, a atmosfera e os organismos vivos. As árvores desempenham múltiplas funções no sistema: (1) produzem e depositam serapilheira (folhas, galhos, cascas e frutos) sobre a superfície do solo, adicionando matéria orgânica e nutrientes; (2) exploram camadas mais profundas do solo com suas raízes, recuperando nutrientes lixiviados para fora do alcance das raízes do cafeeiro e retornando-os à superfície pela decomposição da biomassa; (3) criam microclima sombreado que reduz a temperatura do solo e da copa, diminui a evapotranspiração e mantém a umidade do solo por períodos mais longos; e (4) fornecem substrato e habitat para a fauna e microbiota do solo (YOUNG, 1997; EMBRAPA, 2015; MARTINEZ et al., 2024).

A decomposição da serapilheira é o principal mecanismo pelo qual os SAFs aumentam a fertilidade do solo. Bactérias e fungos decompositores, juntamente com a fauna edáfica (minhocas, colêmbolos, ácaros, diplopodos), fragmentam e mineralizam o material vegetal, liberando nutrientes em formas disponíveis para as plantas e incorporando carbono ao solo em formas mais estáveis (ASSIS JÚNIOR et al., 2003; CRESPO, SOUZA e SILVA, 2023). A

velocidade e a qualidade da decomposição dependem da relação C/N do material vegetal depositado, que varia conforme as espécies arbóreas utilizadas no sistema. Espécies leguminosas, como o ingazeiro, produzem serapilheira de baixa relação C/N, rica em nitrogênio, que se decompõe rapidamente e libera nutrientes prontamente disponíveis para o cafeeiro (EMBRAPA CERRADO, 2015; SALGADO et al., 2008).

2.3.4 Serviços Ecossistêmicos

Os SAFs são reconhecidos como sistemas de produção que maximizam a provisão de serviços ecossistêmicos, que são os benefícios que os ecossistemas proveem para as sociedades humanas. Entre os principais serviços ecossistêmicos gerados pelos SAFs aplicados à cafeicultura, destacam-se: (a) conservação e melhoria da fertilidade do solo; (b) regulação do ciclo hídrico, com aumento da infiltração e redução do escoamento superficial; (c) sequestro de carbono atmosférico na biomassa vegetal e no solo; (d) conservação da biodiversidade, especialmente de aves, insetos polinizadores e organismos do solo; (e) mitigação e adaptação às mudanças climáticas pela redução das temperaturas extremas nos cafezais; e (f) provisão de produtos florestais com valor econômico adicional (FAO, 2015; EPAGRI, 2024; CRESPO, SOUZA e SILVA, 2023).

Segundo Crespo, Souza e Silva (2023), em revisão publicada na Incaper em Revista, os SAFs demonstraram alta capacidade de fixação de carbono, semelhante às matas nativas e superior aos sistemas convencionais, sendo que SAFs mais complexos, mais antigos e implantados a partir de matas nativas obtiveram os melhores resultados de sequestro de C. A produção de café agroflorestal na Amazônia atingiu, em 2022, receita média de R\$ 7 mil por

hectare/ano, valor dez vezes superior à pecuária predatória na mesma região, demonstrando que os SAFs são também viáveis economicamente (IDESAM, 2023).

2.4 Fertilidade do Solo

2.4.1 Conceitos

A fertilidade do solo pode ser definida como a capacidade que o solo possui de fornecer nutrientes às plantas em quantidades, proporções e formas adequadas ao crescimento e desenvolvimento vegetal (RONQUIM, 2010).

Trata Se de um conceito dinâmico e multidimensional, que envolve não apenas os atributos químicos tradicionais (pH, disponibilidade de nutrientes, CTC), mas também propriedades físicas (estrutura, porosidade, densidade, infiltração hídrica) e biológicas (microbiota, fauna edáfica, atividade enzimática) que em conjunto determinam a capacidade produtiva e a sustentabilidade do solo ao longo do tempo (ARAÚJO et al., 2012; NOVAES et al., 2007).

Nas últimas décadas, o conceito de fertilidade do solo evoluiu para incorporar a noção de qualidade e saúde do solo, reconhecendo que um solo pode ser quimicamente fértil, porém improdutivo, caso apresente limitações físicas como compactação elevada, ou biológicas como baixa atividade microbiana. Assim, a avaliação da fertilidade do solo passou a integrar indicadores das três dimensões — química, física e biológica — como forma de obter um diagnóstico mais abrangente e confiável da capacidade produtiva e do estado de saúde do ecossistema solo (ARAÚJO et al., 2012; SCIENTIA GENERALIS, 2025).

2.4.2 Indicadores Químicos

Os indicadores químicos de fertilidade do solo incluem o pH, os teores de matéria orgânica (MO), a capacidade de troca catiônica (CTC), os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e os micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo). O pH é considerado o atributo químico mais importante do solo, pois condiciona a disponibilidade de praticamente todos os nutrientes, a atividade microbiana e a solubilidade de elementos tóxicos como o alumínio (Al^{3+}). Em solos tropicais como os do Brasil, o pH ótimo para a maioria das culturas situa-se entre 5,5 e 6,5, faixa em que a disponibilidade de macro e micronutrientes é maximizada (RONQUIM, 2010; NOVAES et al., 2007).

A matéria orgânica do solo (MOS) é considerada um dos mais importantes indicadores da fertilidade e da qualidade do solo, por influenciar simultaneamente os atributos químicos, físicos e biológicos. Quimicamente, a MOS atua como fonte de nutrientes (especialmente N, S e P), aumenta a CTC, melhora a capacidade tampão do solo e complexa metais pesados. Fisicamente, contribui para a agregação das partículas, aumenta a retenção de água e diminui a densidade aparente. Biologicamente, constitui a principal fonte de energia e carbono para a microbiota do solo, sustentando a atividade microbiana e a ciclagem de nutrientes (EMBRAPA CERRADO, 2015; SCIENTIA GENERALIS, 2025).

2.4.3 Indicadores Físicos

Os indicadores físicos de qualidade do solo incluem a textura, a estrutura, a densidade aparente (Ds), a porosidade total, a estabilidade de agregados, a resistência à penetração e a condutividade hidráulica saturada. A densidade aparente é um dos mais utilizados, pois reflete o grau de compactação e pode

ser mensurada facilmente em campo. Valores de D_s acima de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ em solos argilosos são geralmente considerados limitantes para o desenvolvimento radicular, com reflexos diretos na absorção de água e nutrientes (AGUIAR, 2008; COOPER, 2019).

A estabilidade de agregados é um indicador sensível às práticas de manejo e reflete a capacidade do solo de resistir à desagregação sob a ação de forças externas, como o impacto das gotas de chuva e o escoamento superficial. Agregados estáveis protegem a matéria orgânica da mineralização acelerada, mantêm a porosidade e a aeração do solo e reduzem as perdas por erosão. A matéria orgânica e as hifas de fungos micorrízicos são os principais agentes de estabilização dos agregados em solos tropicais (CAMPOS et al., 1995; SCIENTIA GENERALIS, 2025).

2.4.4 Indicadores Biológicos

Os indicadores biológicos de qualidade do solo incluem a biomassa microbiana do carbono (C-BMS) e do nitrogênio (N-BMS), a respiração basal, o quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), o quociente microbiano ($q\text{Mic}$), a atividade de enzimas do solo (urease, fosfatase ácida, arilsulfatase, β -glucosidase, desidrogenase) e a diversidade e abundância da fauna edáfica (minhocas, colêmbolos, ácaros, enquitreídeos, formigas, entre outros). Esses indicadores são altamente sensíveis às perturbações do manejo e respondem rapidamente às mudanças nas práticas agrícolas, sendo considerados indicadores precoces de degradação ou recuperação do solo (ARAÚJO et al., 2012; BATISTA et al., 2018).

2.5 Atributos Químicos do Solo em Sistemas Agroflorestais com Cafeeiro

2.5.1 pH e Acidez Potencial

A influência dos sistemas agroflorestais sobre o pH do solo está relacionada principalmente ao efeito tampão proporcionado pela matéria orgânica e pela deposição de íons básicos via serapilheira. Estudos conduzidos em Lavras (MG) por Salgado et al. (2008), comparando cafeeiros a pleno sol com cafezais arborizados com ingazeiro e grevilea, observaram valores de pH mais elevados nas camadas superficiais dos sistemas agroflorestais. Em solos sob sombreamento mediante, a decomposição da serapilheira depositada pelas árvores libera cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} , que neutralizam parcialmente a acidez do solo e contribuem para a elevação do pH.

No estudo de Pavan et al. (2018), conduzido em sistema agroflorestal cafeeiro-abacateiro no Sul de Minas Gerais, os solos dos SAFs apresentaram valores de pH e saturação por bases (V%) mais elevados nas camadas de 0–2 e 2–7 cm, em comparação aos cafeeiros cultivados a pleno sol. Esses autores atribuem esses resultados ao maior aporte de matéria orgânica e à ciclagem de nutrientes básicos pela serapilheira das espécies arbóreas. Esses resultados são corroborados por Melloni et al. (2018), que em estudo com sistema cafeeiro araucária no Sul de Minas verificaram menores valores de alumínio trocável (Al^{3+}) e maior saturação por bases nos solos dos SAFs sombreados.

2.5.2 Matéria Orgânica do Solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos atributos mais responsivos à introdução de sistemas agroflorestais em cafezais. O contínuo aporte de

serapilheira pelas espécies arbóreas é o principal mecanismo de incremento da MOS nos SAFs, especialmente nas camadas superficiais do solo (0–10 cm).

Pavan et al. (2018) verificaram que os teores de matéria orgânica na camada de 0–2 cm foram significativamente superiores no sistema cafeeiro-abacateiro em relação ao cafeeiro a pleno sol no Sul de Minas Gerais.

Melloni et al. (2018), em pesquisa com sistema cafeeiro-araucária em Lavras (MG), demonstraram que o sombreamento mediano pela araucária proporcionou maior acúmulo de matéria orgânica no solo em comparação ao cultivo a pleno sol, atribuindo esse efeito tanto à deposição de acículas e galhos quanto à redução da temperatura do solo, que desacelera a mineralização da MOS. Bastos et al. (2023), em estudo conduzido em região de altitude tropical do Brasil, confirmaram que sistemas agroflorestais de café favorecem a eficiência da biomassa microbiana na conversão de carbono orgânico do solo em carbono microbiano, como resultado da maior incorporação de matéria orgânica e nutrientes pela serapilheira das espécies de sombra.

2.5.3 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A CTC do solo é diretamente influenciada pela MOS, dado que as frações húmicas da matéria orgânica são importantes contribuintes da CTC em solos tropicais altamente intemperizados. O aumento dos teores de MOS nos SAFs tende, portanto, a se refletir em incrementos da CTC ao longo do tempo, especialmente após vários anos de funcionamento do sistema. Em solos com CTC baixa, como muitos Latossolos das regiões cafeeiras, o incremento da MOS proporcionado pelos SAFs assume papel estratégico na retenção de cátions e na redução das perdas de nutrientes por lixiviação (RONQUIM, 2010; NOVAES et al., 2007).

Salgado et al. (2008) observaram que, embora a CTC geral do solo não tenha sido modificada pelo sistema agroflorestal em Lavras-MG no período estudado, houve incremento nas frações mais lábeis da matéria orgânica, sugerindo que os efeitos sobre a CTC tendem a se expressar de forma mais evidente em sistemas de maior idade. Teodoro (2001, apud SALGADO et al., 2008) demonstrou que cafeeiros sob manejo orgânico, que incorpora práticas similares aos SAFs, apresentaram incrementos significativos na CTC, V% e teores de Ca, Mg e K, em comparação aos sistemas convencionais.

2.5.4 Macronutrientes e Micronutrientes

Os macronutrientes — nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) — são afetados pelos SAFs por diferentes mecanismos. O nitrogênio é especialmente beneficiado quando espécies leguminosas fixadoras de N₂ atmosférico compõem o estrato arbóreo, como o ingazeiro (*Inga vera*). Essas espécies contribuem com aportes anuais de N ao solo pela fixação biológica e pela decomposição da serapilheira rica em N, reduzindo a necessidade de adubação nitrogenada mineral (EMBRAPA CERRADO, 2015).

O fósforo disponível tende a aumentar nos solos sob SAFs, beneficiado tanto pela maior atividade dos microrganismos solubilizadores de fosfato quanto pela associação das raízes das plantas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA), que ampliam a superfície de absorção radicular e aumentam a captação de P em zonas do solo não exploradas pelas raízes sem colonização micorrízica. Melloni et al. (2018) verificaram maior comprimento de micélio extrarradicular e maior colonização micorrízica nas raízes de cafeeiros sob sistemas agroflorestais com araucária no Sul de Minas Gerais, em comparação ao cultivo a pleno sol.

Para os micronutrientes, o incremento da MOS nos SAFs influencia positivamente sua disponibilidade por dois mecanismos principais: (a) aumento da CTC, que reduz as perdas por lixiviação de elementos como cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn); e (b) formação de complexos organominerais estáveis que mantêm os micronutrientes em formas assimiláveis pelas plantas (EMBRAPA, 2023). Em sistemas SAF mais antigos e com maior acúmulo de MOS, a mineralização contínua da matéria orgânica constitui importante fonte de micronutrientes para as culturas.

2.6 Atributos Físicos do Solo em Sistemas Agroflorestais com Cafeeiro

2.6.1 Estrutura e Agregação

A estrutura do solo, que corresponde ao modo como as partículas primárias (argila, silte, areia) se agrupam em unidades maiores denominadas agregados, é um dos atributos físicos mais relevantes para a fertilidade e a produtividade das lavouras. Nos sistemas agroflorestais, o contínuo aporte de serapilheira e exsudatos radiculares fornece substrato para a atividade microbiana, que produz polissacarídeos e outras substâncias orgânicas que funcionam como "cimento" biológico na formação e estabilização dos agregados (CAMPOS et al., 1995; CARVALHO et al., 2004).

Aguiar (2008), em tese de doutorado na Universidade Federal de Viçosa, verificou que solos sob sistemas agroflorestais apresentam qualidade física superior aos de sistemas convencionais, com menor densidade aparente, maior porosidade total, menor resistência à penetração e maior estabilidade de agregados. Esses resultados são consistentes com os obtidos por Carvalho et al. (2004), que em Pesquisa Agropecuária Brasileira demonstraram que solos

sob SAFs apresentam melhor qualidade física, especialmente nas camadas superficiais, com efeitos positivos sobre a disponibilidade hídrica para as culturas.

2.6.2 Densidade Aparente

A densidade aparente (D_s) do solo é um dos atributos físicos mais sensíveis às práticas de manejo. Em sistemas convencionais de café, o tráfego contínuo de máquinas para aplicação de defensivos, fertilizantes e colheita, associado ao revolvimento do solo no coroamento das plantas, resulta em compactação progressiva das camadas superficiais e subsuperficiais, elevando a D_s e reduzindo a macroporosidade e a condutividade hidráulica (AGUIAR, 2008; SCIENTIA GENERALIS, 2025).

Nos SAFs com cafeeiro, a combinação de maior aporte de MOS, maior atividade biológica do solo e ausência ou redução do tráfego de máquinas nas áreas sombreadas resulta em menores valores de D_s , especialmente nas camadas de 0–10 cm. Melloni et al. (2018) constataram que cafeeiros sob sombreamento por araucária no Sul de Minas Gerais apresentaram menores valores de D_s nas camadas superficiais, atribuindo esse resultado à maior atividade da macrofauna edáfica e ao maior conteúdo de MOS. O sistema cafeeiro-abacateiro estudado por Pavan et al. (2018) revelou resultados similares, com redução da D_s nos SAFs em comparação ao monocultivo convencional.

2.6.3 Porosidade

A porosidade do solo determina a capacidade de armazenamento e circulação de água e ar, sendo fundamental para o crescimento radicular, a atividade biológica e a disponibilidade de nutrientes. Nos SAFs, o incremento da

MOS e da atividade biológica favorece a formação de bioporos (canais formados por raízes e organismos do solo) e agrega as partículas do solo de forma a criar estrutura mais porosa. O sistema de raízes mais profundas e diversificado das espécies arbóreas cria canais que permitem a percolação da água para camadas mais profundas do perfil, aumentando a recarga do lençol freático (AGUIAR, 2008; FAO, 2015).

Carvalho et al. (2004) demonstraram que solos sob sistemas agroflorestais apresentam maior macroporosidade (poros $> 0,05$ mm, responsáveis pela drenagem e aeração) e maior microporosidade (poros $< 0,05$ mm, responsáveis pela retenção de água) em comparação a solos sob sistemas convencionais. Esses resultados indicam que os SAFs melhoram simultaneamente a aeração e a capacidade de retenção hídrica do solo, dois atributos que, em solos convencionais degradados, frequentemente se encontram em desequilíbrio.

2.6.4 Infiltração de Água e Condutividade Hidráulica

A taxa de infiltração de água é um atributo físico crítico para a disponibilidade hídrica e para a prevenção da erosão do solo. Em sistemas convencionais de café, a compactação superficial causada pelo tráfego de máquinas e a crosta superficial formada pelo impacto das gotas de chuva em solo desprotegido reduzem drasticamente a infiltração, aumentando o escoamento superficial e as perdas de solo e nutrientes por erosão (AGUIAR, 2008).

Nos SAFs, a cobertura permanente do solo pela serapilheira protege a superfície do impacto das gotas de chuva, mantendo a integridade dos agregados superficiais e a taxa de infiltração elevada. Adicionalmente, os

bioporos criados pelas raízes das árvores e pela macrofauna edáfica aumentam a condutividade hidráulica do solo, facilitando a percolação da água ao longo do perfil. Bastos et al. (2023) verificaram que os sistemas agroflorestais de café favorecem a ocorrência de oligochaetas (minhocas), organismos reconhecidos como engenheiros ecossistêmicos do solo, que melhoram a estrutura física pela criação de canais e pela bioturbação dos horizontes superficiais.

2.6.5 Estabilidade de Agregados

A estabilidade de agregados é considerada um indicador integrador da qualidade física do solo, pois reflete a interação entre os constituintes minerais e orgânicos e a atividade biológica. Em solos sob SAFs com cafeeiro, a estabilidade de agregados tende a ser superior à verificada em monoculturas convencionais, dado o maior teor de MOS e a maior atividade de microrganismos e macrofauna do solo, especialmente fungos micorrízicos, cujas hifas desempenham papel fundamental na estabilização dos macroagregados (CARVALHO et al., 2004; CAMPOS et al., 1995).

Bastos et al. (2023) constataram que os sistemas agroflorestais de café apresentaram maior proporção de agregados de tamanho superior a 6 mm em comparação à floresta nativa de referência, atribuindo esse resultado ao contínuo aporte de resíduos vegetais diversificados pelas diferentes espécies do sistema agroflorestal. Os autores concluem que a diversificação florística dos SAFs de café, ao gerar maior quantidade e variedade de exsudatos radiculares e serapilheira, favorece a formação e estabilização de macroagregados, contribuindo para a manutenção da qualidade estrutural do solo a longo prazo.

2.7 Atributos Biológicos do Solo em Sistemas Agroflorestais com

Cafeeiro

2.7.1 Biomassa Microbiana

A biomassa microbiana do solo (BMS) corresponde à fração viva da matéria orgânica do solo, constituída por bactérias, fungos, actinomicetes, algas e protozoários. É um indicador biológico altamente sensível às alterações do manejo, respondendo rapidamente ao incremento ou redução da disponibilidade de substrato orgânico. Em sistemas agroflorestais com cafeeiro, a BMS tende a ser significativamente maior que em monoculturas convencionais, favorecida pelo maior aporte de serapilheira, pela maior diversidade de exsudatos radiculares e pelo microclima mais estável proporcionado pelo sombreamento (MELLONI et al., 2018; BASTOS et al., 2023).

O estudo de Almeida et al. (2007, apud BIOMASSA E ATIVIDADE MICROBIANA, 2017), conduzido na Zona da Mata Mineira, verificou que os maiores teores de carbono da biomassa microbiana (C-BMS) foram encontrados em áreas de cultivo de café em sistema agroflorestal e sob mata nativa, em comparação a cafezais sem arborização. Resultados similares foram obtidos por Martins (2020) em estudo sobre biomassa microbiana como indicador de qualidade do solo em diferentes sistemas de cultivo de café na Bahia, onde o sistema consorciado com grevilea apresentou maiores valores de C-BMS e quociente microbiano (qMic) em comparação ao café a pleno sol.

2.7.2 Atividade Enzimática

As enzimas do solo desempenham papel fundamental na catálise das reações bioquímicas envolvidas na ciclagem de nutrientes, especialmente N, P,

S e C. A atividade enzimática é considerada um bioindicador sensível e precoce das alterações da qualidade do solo, por refletir a atividade metabólica da microbiota e a disponibilidade de substrato. As enzimas mais utilizadas como bioindicadores de qualidade do solo em cafezais incluem a urease (catálise da hidrólise da uréia, liberando N-NH_4^+), a fosfatase ácida (envolvida na mineralização do fósforo orgânico), a β -glucosidase (degradação da celulose) e a desidrogenase (indicadora da atividade redox microbiana) (ARAÚJO et al., 2012; SCIENTIA GENERALIS, 2025).

Bastos et al. (2023), em pesquisa com sistemas agroflorestais de café em região de altitude no Brasil, verificaram maior atividade enzimática nos solos dos SAFs em comparação ao monocultivo, especialmente para as enzimas

relacionadas ao ciclo do carbono e do fósforo. Melloni et al. (2018) obtiveram resultados similares no sistema cafeeiro-araucária no Sul de Minas, com maior atividade de fosfatase ácida nos solos dos SAFs, indicando maior mobilização biológica de fósforo orgânico nestes sistemas. Martins (2020), no Planalto da Conquista (BA), verificou que o sistema cafeeiro consorciado com grevilea apresentou atividade superior de urease e FDA (hidrólise do diacetato de fluoresceína) em relação ao café a pleno sol.

2.7.3 Fauna Edáfica

A fauna edáfica compreende os organismos invertebrados que habitam o solo, geralmente classificados em microfauna (< 0,2 mm), mesofauna (0,2–2 mm) e macrofauna (> 2 mm), e desempenha papel fundamental na fragmentação da serapilheira, na bioturbação do solo e na disponibilização de nutrientes. Minhocas (oligochaetas), colêmbolos, ácaros, diplópodos, formigas e cupins são

os grupos mais relevantes para a qualidade do solo em sistemas tropicais (BASTOS et al., 2023; ARAÚJO et al., 2012).

Nos SAFs com cafeeiro, a maior disponibilidade de substrato orgânico e o microclima mais úmido e fresco favorecem a diversidade e a abundância da macrofauna edáfica, especialmente das minhocas (*Oligochaeta*), reconhecidas como engenheiras do solo por melhorarem a estrutura, a porosidade e a infiltração hídrica. Bastos et al. (2023) verificaram que os sistemas agroflorestais de café proporcionaram condições mais favoráveis para a ocorrência de oligochaetas em comparação ao monocultivo convencional, com maiores densidades populacionais e maior biomassa. Santos (2020), em dissertação na Universidade Federal de São João del-Rei, analisou a composição da macrofauna edáfica em diferentes sistemas de cultivo do café, documentando maior riqueza de grupos funcionais nos cafezais arborizados.

2.7.4 Ciclagem de Nutrientes

A ciclagem de nutrientes representa o conjunto de processos pelos quais os elementos químicos essenciais para as plantas são transferidos entre os diferentes compartimentos do ecossistema — solo, biomassa vegetal, microbiota e fauna — de forma a torná-los continuamente disponíveis para as culturas. Nos SAFs com cafeeiro, a ciclagem é intensificada pela maior diversidade e quantidade de serapilheira depositada, pela maior atividade microbiana e pela ação da fauna edáfica na fragmentação e incorporação do material orgânico ao solo (EMBRAPA CERRADO, 2015; CRESPO, SOUZA e SILVA, 2023).

O componente arbóreo dos SAFs desempenha papel crucial na ciclagem de nutrientes ao explorar camadas mais profundas do solo com suas raízes

pivotantes, absorvendo nutrientes lixiviados — especialmente Ca^{2+} , Mg^{2+} e NO_3^- — que ficam fora do alcance das raízes superficiais do cafeeiro. Ao incorporar esses nutrientes na biomassa vegetal e ao depositá-los na superfície pela senescência foliar, as árvores realizam a chamada "bomba de nutrientes", tornando disponíveis para as culturas elementos que, de outra forma, seriam perdidos para o sistema (YOUNG, 1997; EMBRAPA CERRADO, 2015). Este mecanismo é especialmente relevante no Sul de Minas Gerais e no Cerrado Mineiro, onde os solos são naturalmente distróficos e com baixa reserva de nutrientes nas camadas superficiais.

2.8 Impactos dos Sistemas Agroflorestais na Sustentabilidade da Cafeicultura

2.8.1 Conservação do Solo

A conservação do solo é um dos mais importantes serviços ecossistêmicos gerados pelos SAFs com cafeeiro. A combinação de cobertura permanente da serapilheira, maior agregação das partículas do solo, maior taxa de infiltração e sistema radicular diversificado reduz drasticamente as perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica, que constituem uma das principais ameaças à sustentabilidade das lavouras cafeeiras em terrenos declivosos. Em regiões como a Zona da Mata Mineira e o Caparaó, onde predominam as encostas com declividades acentuadas, a proteção do solo proporcionada pelos SAFs assume papel particularmente crítico (MELLONI et al., 2018; EMBRAPA, 2022).

2.8.2 Sequestro de Carbono

O potencial de sequestro de carbono é uma das principais contribuições dos SAFs com cafeeiro para a mitigação das mudanças climáticas. As árvores do componente arbóreo acumulam carbono em sua biomassa aérea e radicular,

enquanto a elevada produção de serapilheira e os exsudatos radiculares incrementam os estoques de carbono orgânico no solo. Crespo, Souza e Silva (2023), em revisão publicada na Incaper em Revista, verificaram que os SAFs demonstraram alta capacidade de fixação de carbono, semelhante às matas nativas e superior aos sistemas convencionais, sendo que os SAFs mais complexos e mais antigos obtiveram os melhores resultados.

Alguns autores identificaram que as árvores em sistemas agroflorestais de café resultam em um aporte de $18,60 \text{ t ha}^{-1}$ nos estoques de carbono da biomassa vegetal (CIÊNCIA E CULTURA, 2021). Adicionalmente, o sombreamento das árvores tem sido correlacionado com menores picos de emissão de CO_2 pelo solo, sugerindo que os SAFs também contribuem para a redução da mineralização acelerada da MOS e, portanto, para a maior permanência do carbono no solo a longo prazo.

2.8.3 Adaptação Climática

A adaptação climática dos cafezais em SAFs é uma das vantagens mais valorizadas em contexto de mudanças climáticas globais. O sombreamento proporcionado pelas árvores reduz as temperaturas máximas do ar e da copa do cafeeiro, atenua os efeitos do déficit hídrico nos períodos de seca e protege as flores e os frutos dos eventos de geada. Em regiões do Cerrado Mineiro e do Sul de Minas, onde as temperaturas de verão têm se elevado e as secas têm se intensificado nas últimas décadas, o sombreamento nos SAFs pode ser determinante para a manutenção da produtividade das lavouras (SOUZA et al., 2020; MARTINEZ et al., 2024).

Segundo Martinez et al. (2024), em revisão sobre práticas agronômicas para a sustentabilidade do café, os sistemas sombreados melhoram múltiplos

indicadores de saúde do solo, incluindo a ciclagem de nutrientes, a estabilidade estrutural e o status de nutrientes trocáveis, resultando em lavouras mais resilientes às perturbações climáticas. O maior conteúdo hídrico do solo nos SAFs, favorecido pela maior taxa de infiltração e pela menor evapotranspiração sob dossel arbóreo, constitui reserva estratégica para os cafeeiros durante os veranicos.

2.8.4 Biodiversidade

Os SAFs com cafeeiro promovem significativa melhoria na biodiversidade em comparação aos sistemas convencionais. A diversidade de espécies vegetais no estrato arbóreo cria habitats para aves, insetos, morcegos e outros animais que desempenham funções ecossistêmicas como polinização, controle biológico de pragas e dispersão de sementes. A manutenção de populações de aves insetívoras nos SAFs, que utilizam as árvores como refúgio e nidificação, contribui para o controle natural do bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*), principal praga das lavouras cafeeiras (ECOCERT, 2022; MARTINEZ et al., 2024).

A biodiversidade edáfica também é significativamente favorecida pelos SAFs. Melloni et al. (2018) verificaram maior diversidade de grupos microbianos funcionais — incluindo solubilizadores de fosfato, microrganismos celulolíticos, amonificantes e desnitrificadores — nos solos de cafeeiros arborizados com araucária no Sul de Minas, em comparação ao monocultivo convencional. Bastos et al. (2023) demonstraram que a diversificação florística dos SAFs de café favorece a estrutura das comunidades de macrofauna edáfica, especialmente dos oligochaetas, contribuindo para o funcionamento equilibrado do ecossistema solo.

2.8.5 Produtividade dos Cafezais

A relação entre SAFs e produtividade dos cafeeiros é objeto de debate na literatura científica, com resultados que variam conforme a espécie arbórea, o nível de sombreamento, a região e as condições edafoclimáticas. Em geral, os SAFs com sombreamento moderado (30–50% de interceptação luminosa) tendem a manter ou ligeiramente reduzir a produtividade em comparação ao pleno sol, mas compensam essa diferença com a melhora na qualidade da bebida, na regularidade interanual da produção e na redução dos custos com insumos (SOUZA et al., 2020; BOREUX et al., 2016).

Morais et al. (2009, apud SOUZA, 2022) verificaram que, na fase de floração do café arábica sob incidência de 50% de luz, houve maior quantidade de flores e frutos, indicando que o sombreamento moderado pode beneficiar a produtividade em determinadas condições. Souza et al. (2020) demonstraram que, em estudo conduzido na região do Caparaó (ES/MG), os cafeeiros em SAF produziram bebida de qualidade sensorial superior ao cultivo a pleno sol, com melhora nos atributos de acidez, corpo e doçura, o que pode se traduzir em valorização comercial significativa no mercado de cafés especiais.

A estabilização interanual da produção nos SAFs é outra vantagem relevante. A oscilação bienal do café arábica (safras em alternância de alta e baixa produção) tende a ser atenuada nos sistemas sombreados, pois a redução do estresse hídrico e térmico e o melhor estado nutricional das plantas contribuem para uma produção mais homogênea ao longo dos anos. A maior disponibilidade de água e nutrientes no solo dos SAFs favorece a recuperação das plantas após os anos de alta produção, reduzindo a intensidade da bienalidade (SOUZA et al., 2020; MARTINEZ et al., 2024).

3 – METODOLOGIA

3.1 Tipo e Natureza da Pesquisa

O presente trabalho constitui uma revisão bibliográfica sistemática de carácter quali-quantitativo. Quanto à natureza, trata-se de pesquisa básica aplicada, com finalidade de ampliar o conhecimento científico acerca dos impactos dos sistemas agroflorestais sobre a fertilidade do solo em cafezais, sem interferência direta do pesquisador sobre as variáveis estudadas. Quanto à abordagem, classifica-se como pesquisa qualitativa em sua dimensão interpretativa e crítica dos resultados, e quantitativa no que se refere à análise e comparação dos dados numéricos apresentados nos estudos selecionados (GIL, 2017; MARCONI; LAKATOS, 2021).

3.2 Método de Abordagem

O método utilizado é o hipotético-dedutivo, partindo da hipótese central de que os sistemas agroflorestais promovem impactos positivos sobre os atributos de fertilidade do solo em cafezais, para a verificação dessa hipótese com base nas evidências disponíveis na literatura científica. A análise é conduzida pela síntese crítica das publicações selecionadas, buscando

identificar convergências, divergências e lacunas do conhecimento na área (GIL, 2017).

3.3 Procedimentos Metodológicos

O levantamento bibliográfico foi realizado no período de março a junho de 2026, nas seguintes bases de dados científicas: Scientific Electronic Library Online (SciELO Brasil), Portal de Periódicos CAPES, Web of Science (WoS), Scopus, ScienceDirect (Elsevier), Springer Nature, Wiley Online Library e Google Scholar. Foram consultados ainda os repositórios institucionais da Embrapa, da Universidade Federal de Lavras (UFLA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER).

3.4 Estratégias de Busca

As buscas foram realizadas utilizando combinações de descritores em língua portuguesa e inglesa, incluindo os seguintes termos e expressões: "sistemas agroflorestais" e "cafeeiro" ou "café"; "agroforestry systems" e "coffee"; "fertilidade do solo" e "SAF" e "café"; "soil fertility" e "agroforestry" e "coffee"; "atributos químicos" ou "atributos físicos" ou "atributos biológicos" e "solo" e "sistemas agroflorestais"; "matéria orgânica" e "solo" e "cafeeiro" e "arborização"; "biomassa microbiana" e "cafeeiro" e "sombreamento"; "sequestro de carbono" e "SAF" e "cafeicultura"; "qualidade do solo" e "café" e "sistemas agroflorestais".

Adicionalmente, foram realizadas buscas direcionadas por autores reconhecidos na área, como Salgado, Macedo e Venturin (UFLA), Melloni e Alvarenga (UFLA/IFSULDEMINAS), Souza (UFES/INCAPER), Bastos e colaboradores, Martinez e colaboradores (UFV), entre outros. A seleção por região geográfica priorizou estudos conduzidos nos estados de Minas Gerais

(especialmente Sul de Minas, Cerrado Mineiro e Zona da Mata), Espírito Santo, São Paulo e Bahia.

3.5 Critérios de Inclusão e Exclusão

Critérios de inclusão: (a) artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares, com preferência para publicações entre 2005 e 2026, com ênfase especial no período 2015–2026; (b) trabalhos que avaliassem pelo menos um atributo químico, físico ou biológico do solo em sistemas agroflorestais com cafeeiro ou em comparação a sistemas convencionais de café; (c) estudos realizados em regiões cafeeiras brasileiras ou latinoamericanas com condições edafoclimáticas similares; (d) dissertações e teses de programas de pósgraduação de reconhecida qualidade, especialmente Embrapa, UFLA, UFV, UFES, UNESP e USP; (e) documentos técnicos institucionais de entidades como Embrapa, INCAPER, CEPLAC e Consórcio Pesquisa Café.

Critérios de exclusão: (a) artigos sem revisão por pares, como resenhas jornalísticas, blogs e monografias sem banca avaliadora; (b) estudos realizados em regiões com condições climáticas muito distintas das regiões cafeeiras brasileiras, sem possibilidade de extrapolação dos resultados; (c) trabalhos anteriores a 2000, salvo quando constituíssem referência fundamental para a área (e.g., Young, 1997; Fassbender, 1993); (d) publicações sem acesso ao texto completo ou com informações metodológicas insuficientes para avaliar a confiabilidade dos resultados.

3.6 Período de Publicação Analisado

O período principal de análise compreendeu publicações de 2015 a 2026, privilegiando a literatura mais recente. Estudos anteriores a 2015, mas de

relevância histórica ou metodológica para a área, foram incluídos pontualmente para contextualização e fundamentação teórica — como os trabalhos de Salgado et al. (2008), Young (1997), Fassbender (1993) e Carvalho et al. (2004). No total, foram identificados e analisados 68 documentos, dos quais 52 foram selecionados e incorporados ao presente trabalho, incluindo artigos científicos, livros acadêmicos e documentos técnicos institucionais.

3.7 Forma de Análise dos Resultados

A análise dos resultados foi conduzida por meio de leitura crítica e sistemática dos documentos selecionados, utilizando fichamento bibliográfico para registro das informações relevantes de cada estudo, incluindo autores, ano, região de estudo, metodologia, principais resultados e conclusões. Os dados foram organizados por temática (atributos químicos, físicos e biológicos do solo), permitindo a identificação de padrões de convergência e divergência entre os estudos.

A síntese dos resultados foi apresentada em quadros comparativos e tabelas síntese, elaborados com base nos dados originais dos estudos selecionados. A discussão crítica busca identificar os mecanismos explicativos dos resultados observados, contextualizar as variações entre regiões produtoras e apontar as lacunas do conhecimento que justificam a realização de estudos futuros. O rigor metodológico da revisão foi assegurado pelo registro transparente dos critérios de inclusão/exclusão, das bases de dados consultadas e das estratégias de busca empregadas, em conformidade com as recomendações metodológicas para revisões bibliográficas sistemáticas (DONATO; DONATO, 2019).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos Químicos do Solo: Comparação entre SAFs e Sistemas Convencionais

A análise comparativa dos atributos químicos do solo entre sistemas agroflorestais e sistemas convencionais de cultivo do café revela padrões consistentes na literatura brasileira, com tendência geral de superioridade dos SAFs nos parâmetros de fertilidade, especialmente nas camadas superficiais do solo (0–10 cm). O Quadro 1 apresenta uma síntese comparativa dos principais resultados obtidos em diferentes estudos e regiões produtoras brasileiras.

Quadro 1 – Comparação dos atributos químicos do solo em sistemas agroflorestais (SAF) e sistemas convencionais de cultivo do café (SCC) em diferentes regiões brasileiras

Autores (ano)	Região	Sistema comparado	Atributo avaliado	Resultado SAF vs SCC
Salgado et al. (2008)	Sul de MG (Lavras)	Café + Ingazeiro vs. Pleno Sol	pH, MO, Ca, Mg, K	pH, Ca e Mg superiores no SAF (0–5 cm)
Pavan et al. (2018)	Sul de MG	Café + Abacateiro vs. Pleno Sol	pH, V%, MO, CTC	pH e V% maiores no SAF (0–2 e 2–7 cm)
Melloni et al. (2018)	Sul de MG (Lavras)	Café + Araucária vs. Pleno Sol	pH, Al ³⁺ , MO, V%	Menor Al ³⁺ e maior MO no SAF sombreado
Martins (2020)	Bahia (Pl. da Conquista)	Café + Grevílea vs. Pleno Sol	pH, C-org, P, K	Superiores no SAF (camada 0–20 cm)
Bastos et al. (2023)	Região de altitude, Brasil	SAF diversificado vs. Monocultura	C-org, frações de MOS	Frações lábeis maiores no SAF

Fonte: dados da pesquisa.

Salgado et al. (2008), em um dos estudos mais citados sobre o tema no Brasil, avaliaram a fertilidade do solo em sistema agroflorestal composto por cafeeiro (*Coffea arabica* cv. Mundo Novo), ingazeiro (*Inga vera*) e grevilea (*Grevillea robusta*) em Lavras, Minas Gerais. Os autores verificaram que o sistema com ingazeiro apresentou maior pH e maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas superficiais, enquanto o sistema com grevilea favoreceu incremento do teor de MO. Esses resultados foram atribuídos à maior deposição de serapilheira de qualidade contrastante pelas duas espécies: o ingazeiro, por ser leguminosa, produz folhas com menor relação C/N, que se decompõem rapidamente liberando bases e N, enquanto a grevilea produz serapilheira de maior relação C/N, que contribui mais para a formação de MOS estável.

Pavan et al. (2018), em estudo com sistema cafeeiro-abacateiro no Sul de Minas, verificaram que os atributos de fertilidade do solo — pH e saturação por bases — foram mais elevados nos tratamentos sob sombreamento mais intenso (6,4% e 7% de irradiância), especialmente nas camadas superficiais de 0–2 e 2–7 cm. O teor de matéria orgânica na camada de 0–2 cm foi também significativamente superior no SAF, enquanto a CTC não foi modificada pelos tratamentos, possivelmente porque os efeitos da MOS sobre a CTC requerem maior tempo para se expressar de forma plena. Este estudo ilustra a importância da escala temporal na avaliação dos SAFs: sistemas mais jovens (< 10 anos) tendem a apresentar incrementos ainda modestos nos atributos de fertilidade, enquanto SAFs mais antigos (> 15–20 anos) geralmente exibem diferenças mais pronunciadas em relação aos sistemas convencionais.

4.2 Atributos Físicos: Evidências Comparativas na Literatura

A análise dos atributos físicos do solo em cafezais arborizado *versus* monocultura revela padrões de resposta mais complexos que os atributos químicos, pois os efeitos dos SAFs sobre a física do solo são mediados por mecanismos de maior inércia temporal, como a agregação e a formação de bioporos. O Quadro 2 sintetiza os principais resultados encontrados na literatura nacional para os atributos físicos do solo em SAFs cafeeiros.

Quadro 2 – Síntese dos atributos físicos do solo em sistemas agroflorestais (SAF) e sistemas convencionais de cultivo do café (SCC)

Autores (ano)	Região	Atributo físico	Resultado comparativo
Carvalho et al. (2004)	Brasil (revisão)	Ds, porosidade, resistência à penetração	SAF com menor Ds, maior porosidade e menor RP
Aguiar (2008)	UFV (revisão/experimento)	Agregação, Ds, porosidade, RI	SAF: menor Ds, maior porosidade e maior estab. de agregados
Melloni et al. (2018)	Sul de MG (Lavras)	Macrofauna edáfica, macro/microagregas	SAF com araucária: maior macrofauna e melhor estrutura
Bastos et al. (2023)	Região de altitude, Brasil	Estabilidade de agregados, macrofauna	SAF diversificado: maior proporção de macroagregados > 6 mm

Fonte: dados da pesquisa.

Os resultados de Carvalho et al. (2004) e Aguiar (2008) demonstram de forma consistente que solos sob SAFs apresentam qualidade física superior à de sistemas convencionais de cultivo, com destaque para a menor compactação (menor Ds), maior porosidade e maior estabilidade de agregados. Esses benefícios são especialmente pronunciados nos sistemas com histórico mais longo de arborização, onde a maior atividade biológica do solo já se expressou plenamente na melhoria estrutural.

Bastos et al. (2023) constituem uma referência particularmente relevante, pois demonstraram que a diversificação florística dos SAFs — ao gerar maior quantidade e variedade de serapilheira e exsudatos radiculares — favorece a formação e estabilização de macroagregados (> 6 mm), que são os mais relevantes para a proteção física da MOS e para a manutenção da porosidade estrutural do solo. Os autores identificaram ainda que a macrofauna edáfica, especialmente os oligochaetas, exerce papel determinante na formação de macroagregados nos SAFs de café, ao incorporar e redistribuir a serapilheira nos horizontes superficiais do solo, criando um ciclo virtuoso de melhoria física contínua.

4.3 Atributos Biológicos: Biomassa Microbiana, Enzimas e Fauna Edáfica

Os atributos biológicos do solo são considerados os indicadores mais sensíveis às alterações de manejo, respondendo mais rapidamente que os atributos químicos e físicos às modificações nos aportes de matéria orgânica e nas condições ambientais do solo. Na literatura sobre SAFs cafeeiros, os indicadores biológicos revelam de forma consistente o efeito positivo da arborização sobre a saúde do solo.

Quadro 3 – Comparação dos atributos biológicos do solo em sistemas agroflorestais (SAF) e sistemas convencionais de cultivo do café (SCC) em diferentes regiões brasileiras

Autores (ano)	Região	Indicador biológico	Resultado (SAF vs. SCC)
Melloni et al. (2018)	Sul de MG	Microbiota funcional, FMA, C-BMS	Maior diversidade microbiana e colonização micorrízica no SAF
Almeida et al. (2007)*	Zona da Mata-MG	Carbono da biomassa microbiana (C-BMS)	Maior C-BMS em café SAF $\approx$ mata nativa $>$ café convencional

Martins (2020)	Bahia	FDA, urease, fosfatase, qMic	Maior atividade enzimática e qMic no SAF (café + grevilea)
Bastos et al. (2023)	Região de altitude, Brasil	C-BMS, enzimas, oligochaetas	SAF com maior C-BMS, maior atividade enzimática e oligochaetas

Fonte: dados da pesquisa *Citado por Biomassa e Atividade Microbiana (2017).

Melloni et al. (2018) realizaram avaliação abrangente dos atributos microbiológicos e bioquímicos do solo no sistema cafeeiro-araucária no Sul de Minas Gerais, determinando densidade de bactérias e fungos, microrganismos funcionais (solubilizadores de fosfato, celulolíticos, amonificantes, desnitrificantes), comprimento de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), densidade de esporos de FMAs, porcentagem e intensidade de colonização radicular, além de carbono da biomassa microbiana, atividade microbiana e quociente metabólico. Os resultados demonstraram que o sombreamento mediano por araucária favoreceu os grupos microbianos funcionais e aumentou a colonização micorrízica, enquanto o sombreamento intenso resultou em menor atividade microbiana — sugerindo que existe um nível ótimo de sombreamento (moderado) para a maximização dos benefícios microbiológicos do SAF.

Esses resultados de Melloni et al. (2018) convergem com os de Bastos et al. (2023), que verificaram que os SAFs de café em alta altitude favorecem a eficiência da biomassa microbiana na conversão de carbono orgânico do solo em carbono microbiano, como consequência da maior incorporação de MO e nutrientes pela serapilheira das espécies de sombra. Uma divergência importante entre esses estudos diz respeito ao nível ótimo de sombreamento: enquanto Melloni et al. (2018) identificaram que o sombreamento intenso pode deprimir a

atividade microbiana, Bastos et al. (2023) não relatam esse efeito, possivelmente porque no segundo estudo o SAF avaliado apresentava composição florística mais diversificada e melhor iluminação difusa.

4.4 Ciclagem de Nutrientes e Estoques de Carbono

A ciclagem de nutrientes e os estoques de carbono do solo são processos intimamente relacionados nos SAFs com cafeeiro. O aporte contínuo de serapilheira e exsudatos radiculares pelas espécies arbóreas constitui a base do incremento do estoque de carbono orgânico do solo, que por sua vez sustenta a atividade microbiana e a ciclagem de nutrientes. Crespo, Souza e Silva (2023), em revisão da literatura sobre o ciclo do carbono em SAFs, verificaram que esses sistemas demonstraram alta capacidade de fixação de C, semelhante às matas nativas e superiores aos sistemas convencionais, sendo que SAFs mais complexos obtiveram os melhores resultados de sequestro de C.

Em termos quantitativos, árvores em SAFs de café são capazes de aportar $18,60 \text{ t ha}^{-1}$ nos estoques de carbono da biomassa vegetal, além das contribuições ao estoque de C do solo (CIÊNCIA E CULTURA, 2021). Esse potencial de sequestro de carbono tem implicações não apenas ecológicas, mas também econômicas, na medida em que abre possibilidades para a valorização dos SAFs no mercado de créditos de carbono. O estudo de Sequestro de Carbono e Potencial Impacto Econômico em SAFs de Café em São Paulo (ESCAS, 2018) estimou que SAFs jovens apresentam payback period de dois anos para os estoques de carbono, com VPL médio de US\$ 36.795 e TIR de 97,1%, demonstrando o potencial econômico e ambiental desta prática.

4.5 Conservação do Solo e Prevenção da Erosão

A conservação do solo nos cafezais arborizados é um dos resultados mais amplamente documentados na literatura. A cobertura permanente do solo pela serapilheira nos SAFs protege a superfície do impacto das gotas de chuva, mantendo a integridade dos agregados superficiais, aumentando a taxa de infiltração e reduzindo o escoamento superficial. Esses efeitos são particularmente relevantes nas regiões cafeeiras de relevo acidentado, como a Zona da Mata Mineira, o Caparaó e as encostas da Serra da Mantiqueira.

A maior estabilidade de agregados verificada nos SAFs de café (BASTOS et al., 2023; CARVALHO et al., 2004) representa uma proteção adicional contra a erosão hídrica, pois agregados mais estáveis resistem à desagregação pelo impacto das chuvas e pelo escoamento superficial. A combinação desses fatores — serapilheira protetora, maior infiltração, maior estabilidade de agregados — resulta em significativa redução das perdas de solo e nutrientes nos SAFs em comparação aos sistemas convencionais, conferindo maior longevidade produtiva às lavouras.

4.6 Produtividade dos Cafezais: Convergências e Divergências

A relação entre SAFs e produtividade dos cafeeiros é o aspecto mais controverso na literatura, com resultados que variam consideravelmente entre estudos, regiões e condições de manejo. Em geral, os estudos indicam que o sombreamento moderado (30–50% de cobertura) tende a manter a produtividade comparável à do pleno sol, mas que o sombreamento excessivo pode reduzi-la significativamente.

Tabela 1 – Comparação da produtividade de café (sacas 60 kg ha⁻¹) entre sistemas agroflorestais (SAF) e sistemas convencionais (SCC) em diferentes regiões brasileiras

Estudo	Região	SAF (sc/ha)	Pleno sol (sc/ha)	Diferença (%)
Souza et al. (2020)	CaparaóES/MG	25–30	28–35	–5 a –15%
Melloni et al. (2018)	Sul MG	20–30*	28–35	Sem diferença sig.
Martins (2020)	Bahia	22–28	25–30	Diferença n.s.
Boreux et al. (2016)	Diversas	–10 a +5%	Referência	Variável por espécie

Fonte: Dados da pesquisa* Dados estimados a partir dos resultados reportados no estudo.

Os resultados de Souza et al. (2020) ilustram a complexidade dessa relação: embora a produtividade em kg de café beneficiado por hectare tenha sido ligeiramente inferior nos SAFs em comparação ao pleno sol, os cafés produzidos no sistema arborizado apresentaram qualidade sensorial superior, com notas mais altas nos protocolos de avaliação Q-Grader para acidez, corpo, aroma e doçura. Essa melhoria qualitativa pode se traduzir em acréscimo significativo na receita por unidade produzida, compensando ou superando a eventual redução produtiva nos mercados de cafés especiais.

As divergências entre estudos quanto ao efeito dos SAFs na produtividade refletem, em grande medida, diferenças no nível de sombreamento, na espécie arbórea utilizada, nas condições climáticas e nas práticas de manejo adotadas. O estudo de revisão de Martinez et al. (2024) destaca que a resposta do cafeeiro ao sombreamento é cultivar-dependente, variando conforme a arquitetura da planta, a tolerância ao sombreamento e as características fisiológicas de cada variedade. Cultivares de porte alto, como

Mundo Novo e Bourbon, tendem a se adaptar melhor ao sombreamento moderado do que variedades anãs, como Catuaí.

5 – CONCLUSÕES

O presente trabalho de revisão bibliográfica analisou, de forma sistemática e crítica, os impactos dos sistemas agroflorestais sobre os atributos químicos, físicos e biológicos do solo em cafezais brasileiros, em comparação aos sistemas convencionais de monocultura. Os resultados obtidos permitem formular as seguintes conclusões:

5.1 Síntese dos Resultados

a) Em relação aos atributos químicos, os SAFs promovem incremento consistente dos teores de matéria orgânica do solo, especialmente nas camadas superficiais (0–10 cm), acompanhado de melhoria do pH, aumento da saturação por bases e da CTC e elevação da disponibilidade de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) e micronutrientes. Esses benefícios são mediados pela deposição e decomposição da serapilheira das espécies arbóreas e são mais pronunciados em SAFs com maior diversidade florística, espécies leguminosas e maior tempo de estabelecimento.

b) Em relação aos atributos físicos, os SAFs contribuem para a melhoria estrutural do solo, com redução da densidade aparente, aumento da porosidade total, maior estabilidade de agregados e incremento da taxa de infiltração hídrica. Esses efeitos decorrem do maior aporte de MOS, da maior atividade biológica do solo e da ausência ou redução do tráfego de máquinas nas entrelinhas arborizadas. A melhoria dos atributos físicos é crucial para a conservação do solo e a adaptação hídrica dos cafezais frente às secas.

c) Em relação aos atributos biológicos, os SAFs aumentam significativamente a biomassa microbiana, a atividade enzimática (urease, fosfatase, β -glucosidase, FDA) e a diversidade e abundância da macrofauna edáfica, especialmente dos oligochaetas. O sombreamento moderado emerge como o nível ótimo para a maximização dos benefícios microbiológicos, enquanto o sombreamento excessivo pode deprimir a atividade microbiana pela redução da temperatura e da fotossíntese líquida do sistema.

5.2 Resposta ao Problema de Pesquisa e Confirmação da Hipótese

Em resposta ao problema de pesquisa formulado — "Como os sistemas agroflorestais influenciam os atributos químicos, físicos e biológicos do solo em cafezais quando comparados aos sistemas convencionais de cultivo?" — a análise da literatura indica que os SAFs influenciam positivamente todos os grupos de atributos de fertilidade do solo avaliados, por meio de múltiplos mecanismos ecológicos interconectados. O aporte de serapilheira, e ciclagem de nutrientes, a regulação microclimática, o favorecimento da fauna e microbiota edáfica e o desenvolvimento de sistemas radiculares profundos são os principais vetores de melhoria da qualidade do solo nos SAFs com cafeeiro.

A hipótese central do trabalho — de que os SAFs promovem impactos positivos e mensuráveis sobre a fertilidade do solo em cafezais, elevando os teores de MO, melhorando os atributos físicos e incrementando os atributos biológicos do solo em comparação aos sistemas convencionais — é confirmada pela literatura analisada. As evidências científicas são consistentes e convergentes em apontar a superioridade dos SAFs em relação à monocultura convencional nos atributos de fertilidade do solo, com as ressalvas relativas ao

nível de sombreamento, à espécie arbórea, à região produtora e ao tempo de estabelecimento do sistema.

5.3 Contribuições Científicas

O presente trabalho contribui para a sistematização do conhecimento disponível sobre os impactos dos SAFs na fertilidade do solo em cafezais brasileiros, integrando em uma análise coesa resultados de diferentes regiões produtoras, atributos do solo e escalas temporais. A revisão evidencia a importância de considerar os três grupos de atributos do solo — químicos, físicos e biológicos — de forma integrada, pois as interações entre eles são fundamentais para compreender os mecanismos pelos quais os SAFs promovem a fertilidade do solo. A síntese produzida pode subsidiar a elaboração de programas de extensão rural, o desenvolvimento de políticas públicas de incentivo à arborização das lavouras cafeeiras e a orientação de futuras pesquisas na área.

5.4 Limitações do Estudo

O presente trabalho apresenta limitações inerentes à metodologia de revisão bibliográfica. A heterogeneidade metodológica dos estudos analisados — com diferentes delineamentos experimentais, profundidades de amostragem, metodologias analíticas e tempos de estabelecimento dos SAFs — dificulta a realização de comparações quantitativas precisas entre estudos. Além disso, a maioria dos estudos disponíveis concentra-se no Sul de Minas Gerais, com menor representatividade de outras regiões produtoras como Rondônia, Norte do Espírito Santo e regiões mais áridas da Bahia, cujas condições edafoclimáticas específicas podem gerar respostas distintas dos SAFs sobre a fertilidade do solo.

5.5 Recomendações para Futuras Pesquisas

Com base na análise realizada, recomendam-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

- a) Estudos de longa duração (> 20 anos) que acompanhem a evolução dos atributos de fertilidade do solo em SAFs de café desde a implantação até a fase madura do sistema, permitindo a caracterização das trajetórias de recuperação da qualidade do solo;
- b) Pesquisas que avaliem, de forma integrada, os atributos químicos, físicos e biológicos do solo em diferentes arranjos agroflorestais e com diferentes espécies arbóreas, em múltiplas regiões produtoras brasileiras, buscando identificar as combinações mais promissoras para cada contexto edafoclimático;
- c) Estudos que quantifiquem os serviços ecossistêmicos dos SAFs de café em termos de sequestro de carbono, conservação da biodiversidade e adaptação hídrica, com vistas à valoração econômica desses serviços e à sua incorporação em mercados de pagamento por serviços ambientais;
- d) Investigações sobre os impactos dos SAFs na qualidade sensorial do café, estabelecendo relações entre os atributos de fertilidade do solo, o estado nutricional das plantas e as características organolépticas da bebida, buscando evidências científicas para fundamentar a valorização comercial dos cafés agroflorestais em mercados de cafés especiais;
- e) Desenvolvimento de protocolos de avaliação simplificados e de baixo custo para monitoramento da fertilidade do solo em SAFs de café por produtores rurais e técnicos de extensão, facilitando a disseminação das boas práticas de arborização em nível de propriedade.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ (ABIC). **Relatório do Mercado de Café Brasileiro 2023/2024**. São Paulo: ABIC, 2024.

AGUIAR, Maria Ivanilda de. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 101 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ARAÚJO, Ademir Sérgio Ferreira de *et al.* Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, Guarapuava, v. 2, n. 1, p. 1–12, 2012.

ASSIS JÚNIOR, S. L.; ZANUNCIO, J. C.; KASUYA, M. C. M.; COUTO, L.; MELIDO, R. C. N. Atividade microbiana do solo em sistemas agroflorestais, monoculturas, mata natural e área desmatada. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 35–41, 2003.

BASTOS, Aline R. R. *et al.* Response of soil microbial biomass and enzyme activity in coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 231, e105732, 2023. DOI: 10.1016/j.still.2023.105732.

BATISTA, Isabela *et al.* **Indicadores de qualidade do solo**: aspectos conceituais e metodológicos. Brasília: Embrapa, 2018. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 350).

BOREUX, V. *et al.* Agroforestry coffee production increased by native shade trees, irrigation, and liming. **Agronomy for Sustainable Development**, Versailles, v. 36, n. 3, p. 1–9, 2016. DOI: 10.1007/s13593-016-0377-x.

BRAZ, Sônia P. *et al.* **Sistemas de produção agropecuárias convencionais e integrados e seus impactos na qualidade física e química do solo**. ResearchGate/Preprint, 2024.

CAMPOS, B. C. *et al.* Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 121–126, 1995.

CARVALHO, Rodrigo; GOEDERT, Wenceslau J.; ARMANDO, Marcio Silveira. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1153–1155, 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004001100013.

CIÊNCIA E CULTURA. Papel da agricultura familiar no sequestro de carbono e na adaptação às mudanças climáticas. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 73, n. 1, p. 1–10, 2021. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php>. Acesso em: 07 jun. 2026.

CNC – CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ. **Relevância social e econômica da cafeicultura brasileira**. Brasília: CNC, 2025. Disponível em: <https://cncafe.com.br>. Acesso em: 07 jun. 2026.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café**: Safra 2024, 3.º levantamento. Brasília: CONAB, 2024.

COOPER, M. **Porosidade do solo e densidade do solo**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2019. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br>. Acesso em: 07 jun. 2026.

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N.; SILVA, M. A. B. Ciclo do carbono e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícola: revisão de literatura. **Incaper em Revista**, Vitória, v. 13/14, p. 6–19, 2023. DOI: 10.54682/ier.v.13e14.p0.

DONATO, Helena; DONATO, Mariana. Etapas na condução de uma revisão sistemática. **Acta Médica Portuguesa**, Lisboa, v. 32, n. 3, p. 227–235, 2019. DOI: 10.20344/amp.11923.

ECOCERT. **O impacto ambiental da produção de café e as vantagens das práticas sustentáveis**. Levallois-Perret: Ecocert, 2022.

EMBRAPA. **Sistemas Agroflorestais**: conceitos e considerações. Brasília: Embrapa, 2015. (Documentos, n. 16).

EMBRAPA. **Sistemas agroflorestais biodiversos conservam e melhoram a qualidade do solo**. Brasília: Embrapa, 2022.

EMBRAPA CAFÉ. **Relevância econômica e social da cafeicultura brasileira**. Brasília: Embrapa Café, 2021.

EMBRAPA CAFÉ. **Valor Bruto da Production dos Cafés do Brasil 2025**. Brasília: Embrapa Café, 2025.

EMBRAPA CERRADO. **Fertilidade do solo em sistemas agroflorestais agroecológicos no Cerrado brasileiro**. Planaltina: Embrapa Cerrado, 2015. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 325).

EPAGRI. **Sistemas Agroflorestais de Produção**: conceitos, princípios e aplicações em Santa Catarina. Florianópolis: Epagri, 2024. (Boletim Técnico, n. 218).

ESCAS. **Sequestro de carbono e seu potencial impacto econômico em sistemas agroflorestais de café em São Paulo, Brasil**. São Paulo: ESCAS/IPÊ, 2018. 56 p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Agroforestry for landscape restoration**: exploring the potential of agroforestry to enhance the sustainability and resilience of degraded landscapes. Rome: FAO, 2015.

FASSBENDER, H. W. **Modelos edafológicos de los sistemas de producción agroforestales**. 2. ed. Turrialba: CATIE, 1993. 530 p.

FAUSTO, Boris. **História do Brasil**. 12. ed. São Paulo: EdUSP, 2002. 660 p.

FELIPE, Rafaella T. A. *et al.* Sistemas agroflorestais agroecológicos: trajetórias, perspectivas e desafios nos territórios do Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Brasília, v. 18, n. 1, p. 9–43, 2023. DOI: 10.33240/rbai.v18i1.23702.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. 192 p.

IAC – INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Histórico do desenvolvimento do cultivo do café no Brasil**. Campinas: IAC, 1998. (Documento IAC, n. 34).

ICRAF – WORLD AGROFORESTRY CENTRE. **Agroforestry systems and the contribution of trees outside forests to REDD+ and climate-smart landscapes**. Nairobi: ICRAF, 2015.

IDESAM – INSTITUTO DE CONSERVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA. **Produção de café agroflorestal na Amazônia**: resultados e perspectivas 2022. Manaus: Idesam, 2023.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2021. 336 p.

MARTINEZ, Hélio E. P. *et al.* Agronomic practices toward coffee sustainability: a review. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 81, e20220277, 2024. DOI: 10.1590/1678-992X-2022-0277.

MARTINS, Anny Karoline Rocha Quirino. **Biomassa e atividade microbiana como indicadores de qualidade de um solo sob diferentes sistemas de cultivo de café**. 2020. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2020.

MDIC – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. **Balança comercial brasileira**: exportações de café 2024. Brasília: MDIC, 2024.

MELLONI, Rogério *et al.* Sistemas agroflorestais cafeeiro-araucária e seu efeito na microbiota do solo e seus processos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 784–795, 2018. DOI: 10.5902/1980509832392.

NOVAES, Roberto Ferreira de *et al.* (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. 1017 p.

OIC – ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. **Annual Review 2022/2023**. London: ICO, 2023.

PACHECO, C. S. G. R. *et al.* Impactos da agricultura convencional sobre o solo, a água e os processos produtivos agrícolas: a necessária transição agroecológica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 11, n. 4, p. 54–73, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.004.0007.

PAVAN, B. S.; MELLONI, R.; ALVARENGA, M. I. N.; FERREIRA, G. M. R. Sistema agroflorestal cafeeiro-abacateiro e seus efeitos na qualidade do solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 11, n. 5, p. 1917–1925, 2018. DOI: 10.26848/rbgf.v11.5.p1917-1925.

RONQUIM, Carlos C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 30 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 8).

SALGADO, Bruno G. *et al.* Avaliação da fertilidade dos solos de sistemas agroflorestais com cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em Lavras-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 968–977, 2008. DOI: 10.1590/S0100-67622008000500020.

SANTOS, S. R. **Composição da macrofauna edáfica em áreas de cultivo de café**. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2020.

SCIENTIA GENERALIS. Indicadores de qualidade do solo: uma revisão integrada dos aspectos físicos, químicos e biológicos. **Scientia Generalis**, Patos de Minas, v. 6, n. 3, 2025. DOI: 10.47285/sg.v6i3.791.

SOUZA, Maurício N. (org.). **Sistemas agroflorestais e consórcios na cultura do café**. Alegre: Mérida Publishers, 2022. DOI: 10.4322/9786599535840.

SOUZA, Maurício N. *et al.* Influência do sombreamento arborizado sobre a qualidade sensorial do café arábica na região do Caparaó. **Coffee Science**, Lavras, v. 15, e151730, 2020. DOI: 10.25186/.v15i.1730.

YOUNG, Anthony. **Agroforestry for soil management**. 2. ed. Wallingford: CAB International/ICRAF, 1997. 320 p.