

CAPÍTULO 4

Economia circular e manejo sustentável de resíduos na cadeia produtiva do café

Karenn Zavarize Bermond, Dayane Vitória Silva Mello, Rony Mendes Rodrigues, Sara de Oliveira Olimpio, Isabela Berbert da Guia, Tamiris da Silva Gumiere, Willian Moreira da Costa, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6.c4>

Resumo

O Brasil destaca-se como o maior exportador e um dos principais consumidores de café do mundo, atividade de elevada importância econômica, social e cultural. Entretanto, a produção e o processamento dos frutos geram expressivas quantidades de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos que, quando manejados inadequadamente, podem provocar contaminação do solo e dos recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa e desperdício de biomassa com elevado potencial de aproveitamento. Nesse contexto, o presente capítulo analisa estratégias sustentáveis para o manejo e a valorização dos resíduos gerados na cadeia produtiva do café, com ênfase nos princípios da economia circular e da agroecologia. São discutidas alternativas como compostagem, produção de biofertilizantes, fertirrigação com água residuária, utilização de biochar, geração de energia a partir da biomassa e integração com sistemas agroflorestais. Essas práticas promovem a ciclagem de nutrientes, a melhoria da qualidade física, química e biológica do solo, a redução da dependência de insumos externos e a mitigação dos impactos ambientais associados à atividade cafeeira. Além dos benefícios ambientais, o reaproveitamento dos resíduos contribui para a redução de custos produtivos, agregação de valor aos subprodutos e fortalecimento da sustentabilidade econômica e social das propriedades rurais. Conclui-se que a transformação de resíduos em recursos constitui uma estratégia fundamental para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, eficientes e alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade.

Palavras-chave: Economia circular. Agroecologia. Compostagem. Fertirrigação. Biofertilizantes. Sustentabilidade.

1. Introdução

O Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial da cafeicultura, sendo reconhecido como o maior exportador e um dos maiores consumidores de café do planeta. A atividade cafeeira possui elevada relevância econômica, social e cultural, contribuindo significativamente para a geração de emprego, renda e desenvolvimento regional, especialmente em estados produtores como Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo (ABIC, 2025; CECAFÉ, 2025).

Segundo dados do Conselho dos Exportadores de Café do Brasil (CECAFÉ, 2025), o país alcançou, em 2024, um recorde histórico de exportações, totalizando 50,4 milhões de sacas de 60 kg enviadas para 116 países, representando crescimento de 28,5% em relação ao ano anterior. Paralelamente, o consumo interno também se mantém elevado. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC, 2025), entre novembro de 2023 e outubro de 2024, o consumo nacional atingiu aproximadamente 21,9 milhões de sacas industrializadas, com média anual de 5,01 kg de café torrado por habitante.

Entretanto, o crescimento da cadeia produtiva do café também intensifica a geração de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos provenientes das diferentes etapas de cultivo, processamento, beneficiamento e industrialização dos grãos. Entre os principais resíduos gerados destacam-se cascas, polpas, mucilagem, águas residuárias do processamento, embalagens plásticas e resíduos provenientes da torrefação (Murthy; Naidu, 2012; Maciel *et al.*, 2020; Cardozo *et al.*, 2024).

Estima-se que apenas uma pequena parcela do fruto seja efetivamente aproveitada para a produção da bebida, enquanto grande parte da biomassa gerada transforma-se em resíduo ao longo do processamento. Nesse contexto, resíduos orgânicos oriundos da cafeicultura podem representar importante fonte de poluição ambiental quando descartados inadequadamente, ocasionando contaminação do solo e dos recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa, proliferação de microrganismos e geração de odores desagradáveis (Pandey *et al.*, 2000; Janissen; Huynh, 2018; Cardozo *et al.*, 2024).

Além dos impactos e externalidades ambientais, o manejo inadequado dos resíduos pode comprometer a sustentabilidade econômica da atividade,

aumentando custos relacionados ao tratamento, transporte e disposição final desses materiais. Em contrapartida, o reaproveitamento de resíduos da cadeia produtiva do café apresenta elevado potencial para geração de biofertilizantes, compostagem, produção de energia, alimentação animal e aplicação em sistemas agroecológicos, contribuindo para a economia circular e para a redução da dependência de insumos externos (Mussatto *et al.*, 2011; Silva; Souza, 2021). Nessa perspectiva, os resíduos deixam de ser considerados passivos ambientais e passam a constituir recursos capazes de retornar ao sistema produtivo, promovendo o fechamento dos ciclos de matéria e energia (Figura 1).



Figura 1. Transição do modelo de economia linear para o modelo de economia circular na cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A dinâmica apresentada na Figura 1 evidencia a transição de um modelo linear, baseado na extração, utilização e descarte de recursos, para um modelo circular, no qual os resíduos são reinseridos nos processos produtivos por meio da reciclagem, compostagem, geração de energia e produção de insumos agrícolas. Essa abordagem contribui para a redução dos impactos ambientais, para o aumento da eficiência no uso dos recursos naturais e para a agregação de valor aos subprodutos da cafeicultura (Mendonça *et al.*, 2026).

Diante desse cenário, práticas sustentáveis de manejo e reaproveitamento de resíduos tornam-se fundamentais para promover uma cafeicultura

ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável. A adoção dessas estratégias está alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável e às demandas contemporâneas por sistemas produtivos mais resilientes e conservacionistas (FAO, 2023; Faria *et al.*, 2023; Mendonça *et al.*, 2026).

Dessa forma, o presente capítulo tem como objetivo apresentar as principais fontes de resíduos gerados na cadeia produtiva do café, bem como discutir alternativas sustentáveis para seu manejo e reaproveitamento. Busca-se evidenciar o potencial desses subprodutos para a redução dos impactos ambientais, a promoção da economia circular e o fortalecimento da sustentabilidade econômica, social e ambiental da cafeicultura.

2. Produção de resíduos na cadeia do café

A cadeia produtiva do café envolve diversas etapas, desde o cultivo e manejo das lavouras até o processamento, beneficiamento, industrialização e consumo final da bebida. Em todas essas fases ocorre a geração de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos, cuja quantidade aumenta proporcionalmente ao crescimento da produção e do consumo mundial de café (Murthy; Naidu, 2012; Besteti *et al.*, 2025).

A natureza e o volume desses resíduos variam de acordo com a etapa produtiva e com a tecnologia empregada no processamento. De modo geral, materiais como cascas, polpa, pergaminho, mucilagem, borra de café, águas residuárias e resíduos de poda representam os principais subprodutos gerados ao longo da cadeia cafeeira.

A geração de resíduos ao longo da cadeia produtiva do café está diretamente relacionada às transformações físicas e biológicas que ocorrem durante o processamento dos frutos. Em muitos casos, esses materiais ainda são tratados como rejeitos, apesar de apresentarem elevado potencial para reaproveitamento agrícola, energético e industrial. A identificação das principais fontes geradoras de resíduos constitui etapa fundamental para o planejamento de estratégias de manejo sustentável, permitindo reduzir impactos ambientais e agregar valor aos subprodutos da atividade cafeeira. Nesse contexto,

compreender a origem, a composição e a quantidade dos resíduos produzidos em cada fase da cadeia produtiva torna-se essencial para subsidiar práticas de economia circular e fortalecer a sustentabilidade dos sistemas de produção (Faria *et al.*, 2023; Besteti *et al.*, 2025; Mendonça *et al.*, 2026). A Figura 2 apresenta uma visão integrada dos principais resíduos gerados desde a fase de cultivo até o beneficiamento e o consumo do café.

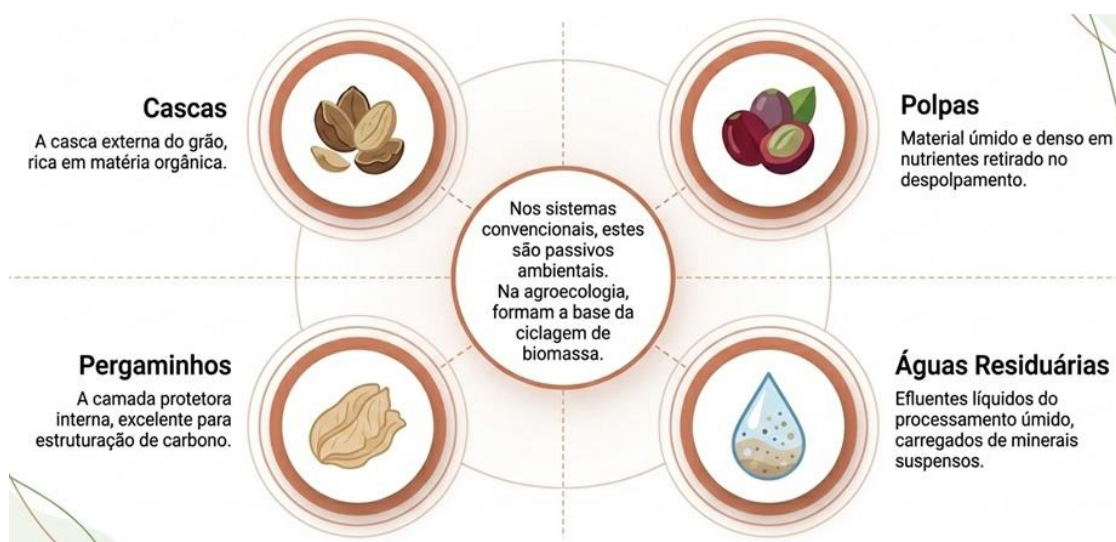


Figura 2. Principais resíduos sólidos, líquidos e orgânicos gerados nas diferentes etapas da cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse contexto, no Brasil, devido à elevada escala de produção cafeeira, a geração de resíduos tornou-se um importante desafio ambiental e econômico. Grande parte desses resíduos possui elevada carga orgânica e, quando manejada inadequadamente, pode provocar impactos ambientais significativos, como contaminação do solo e dos recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa, proliferação de microrganismos e desperdício de biomassa com potencial de reaproveitamento (Maciel *et al.*, 2020; Besteti *et al.*, 2025).

Além disso, a intensificação da cafeicultura e a crescente demanda por produtividade elevam o consumo de insumos, embalagens e fertilizantes, ampliando a complexidade dos resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva. Dessa forma, torna-se fundamental compreender as principais fontes geradoras

desses materiais para subsidiar estratégias de manejo sustentável e valorização dos subprodutos da atividade cafeeira (Mussatto *et al.*, 2011; Besteti *et al.*, 2025).

Sob essa perspectiva, os resíduos provenientes da cadeia cafeeira apresentam elevado potencial para aplicação em práticas sustentáveis, como compostagem, produção de biofertilizantes, geração de energia, alimentação animal e utilização em sistemas agroecológicos. A correta identificação, segregação e destinação desses materiais permite transformar passivos ambientais em recursos produtivos, agregando valor à cadeia do café e reduzindo impactos ambientais. As principais possibilidades de aproveitamento desses resíduos são apresentadas na Figura 3, evidenciando sua contribuição para a economia circular e para o fortalecimento da sustentabilidade na cafeicultura (Silva; Souza, 2021; Zampieri *et al.*, 2025).

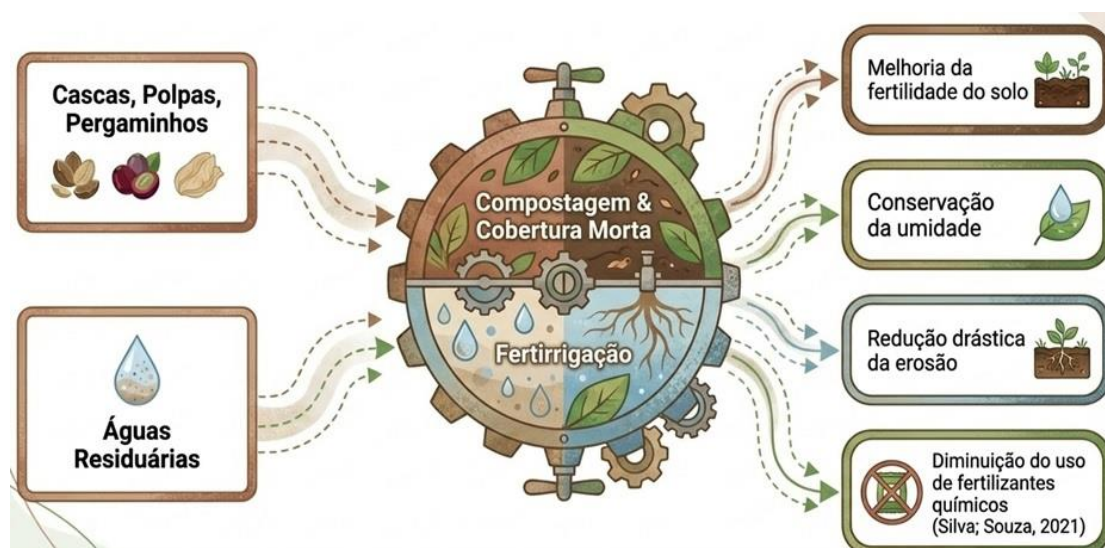


Figura 3. Resíduos da cadeia produtiva do café e suas possibilidades de aproveitamento agrícola, energético e ambiental. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 3 ilustra o fluxo de valorização da biomassa residual na cadeia produtiva do café, evidenciando que o manejo integrado de subprodutos, como polpa, casca, pergaminho e borra, vai além da redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Ao reintegrar esses materiais ao sistema produtivo por meio de rotas biotecnológicas, energéticas e agronômicas, promove-se o fechamento dos ciclos de nutrientes e carbono, fortalecendo os

princípios da economia circular. Essa abordagem contribui simultaneamente para a redução de passivos ambientais, para a otimização do uso dos recursos disponíveis e para a geração de novas oportunidades econômicas na propriedade rural. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender a origem e as características dos diferentes resíduos gerados ao longo da cadeia cafeeira, tema abordado na seção seguinte (Faria *et al.*, 2023; Besteti *et al.*, 2025; Mendonça *et al.*, 2026).

2.1. Resíduos gerados na produção do café

A geração de resíduos na cafeicultura ocorre em praticamente todas as etapas produtivas, atingindo seu ápice na fase de pós-colheita, onde o processamento dos frutos descarta volumes expressivos de materiais sólidos e líquidos, como casca, polpa, mucilagem, pergaminho e águas residuárias (ARC) provenientes da lavagem e despulpa (Pandey *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2024) (Figura 4).



Figura 4. Fluxograma do processamento do café e dos resíduos gerados em cada etapa. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 4 evidencia que a natureza e a quantidade dos resíduos gerados variam conforme a etapa do processamento adotada. Entre os principais fatores

que influenciam essa dinâmica destacam-se os métodos de processamento do café, como *natural*, *semi-dry*, *washed* e fermentação induzida por *Saccharomyces cerevisiae*, os quais diferem essencialmente na forma de remoção da mucilagem e no rigor do controle fermentativo. Consequentemente, cada técnica aplicada não apenas define o manejo dos resíduos gerados, mas também confere perfis sensoriais distintos à bebida, permitindo realçar atributos específicos como doçura, acidez e complexidade aromática (Schwan; Vilela, 2022).

Nesse cenário, o processamento via úmida, essencial para a obtenção de cafés especiais, resulta em uma elevada geração de águas residuárias ricas em matéria orgânica, açúcares e compostos fenólicos. Caso esse efluente seja descartado sem o devido tratamento, pode desencadear processos de eutrofização e a redução drástica do oxigênio dissolvido em corpos hídricos, comprometendo a biodiversidade aquática e a qualidade dos recursos naturais (Janissen; Huynh, 2018; Souza; Simão, 2024).

No beneficiamento por via seca, destacam-se os resíduos lignocelulósicos, como cascas e pergaminhos, que representam parcela significativa da biomassa gerada. Esses materiais apresentam elevado potencial de reaproveitamento em práticas como compostagem, cobertura morta, produção de substratos e geração de energia térmica, contribuindo para a redução da dependência de insumos externos e para o fortalecimento da economia circular (Murthy; Naidu, 2012; Silverio *et al.*, 2025) (Figura 5).

A Figura 5 demonstra que resíduos tradicionalmente considerados passivos ambientais podem ser reinseridos no sistema produtivo como recursos de valor econômico e ambiental. No caso da cafeicultura, a palha do café pode ser direcionada para diferentes finalidades, como cobertura do solo, compostagem, produção de biofertilizantes, geração de energia e fabricação de substratos agrícolas. Essa lógica promove o aproveitamento integral da biomassa, reduz a geração de resíduos e fortalece os princípios da economia circular, contribuindo para maior eficiência no uso dos recursos e para a sustentabilidade da atividade cafeeira.

Além dos resíduos orgânicos, a cadeia cafeeira gera resíduos sólidos provenientes das atividades de campo, como embalagens de fertilizantes,

defensivos agrícolas e sacarias. O descarte inadequado desses materiais pode ocasionar a contaminação química do solo e da água, além de riscos à saúde pública. Tal cenário reforça a necessidade de um gerenciamento ambiental rigoroso e da adoção de práticas de logística reversa, em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).



Figura 5. Reaproveitamento da palha de café e agregação de valor na economia circular. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro aspecto relevante refere-se aos resíduos gerados durante o consumo da bebida, especialmente a borra de café, frequentemente descartada como lixo comum. Estudos recentes demonstram que esse resíduo apresenta elevado potencial para produção de compostos orgânicos, biocombustíveis, cosméticos, biomateriais e até biochar, ampliando as possibilidades de reaproveitamento sustentável ao longo da cadeia cafeeira (Campos-Vega *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a elevada produção de resíduos evidencia a necessidade premente de estratégias sustentáveis de manejo. Segundo Anagnostopoulos *et al.* (2017), estima-se que a produção de uma tonelada de café possa gerar mais de 600 kg de resíduos orgânicos. Complementando essa discussão, Tsigkou *et al.* (2025) destacam que mais de 90% da biomassa dos frutos maduros transforma-se em resíduos sólidos ao longo do processamento, incluindo polpa,

mucilagem, pergaminho e cascas, variando conforme o método de beneficiamento.

Nesse contexto, a quantidade de resíduos gerada ao longo da cadeia produtiva evidencia a necessidade premente de estratégias sustentáveis de manejo, uma vez que representa simultaneamente um desafio ambiental e uma oportunidade para a promoção da sustentabilidade no setor cafeeiro. Embora parte significativa dessa biomassa ainda seja tratada como rejeito, diversos estudos demonstram que esses materiais possuem elevado potencial para reaproveitamento agrícola, energético e industrial. Sob a perspectiva da economia circular, resíduos como polpa, casca, mucilagem e pergaminho podem ser convertidos em insumos capazes de retornar ao sistema produtivo, reduzindo a dependência de recursos externos e minimizando impactos ambientais. Dessa forma, a quantificação da biomassa residual torna-se fundamental para compreender a dimensão do problema e identificar oportunidades de valorização desses subprodutos (Faria *et al.*, 2023; Besteti *et al.*, 2025; Mendonça *et al.*, 2026). A Figura 6 apresenta uma síntese da geração de resíduos e das possibilidades de aproveitamento da biomassa residual ao longo da cadeia produtiva do café.



Figura 6. Produção de resíduos e potenciais de aproveitamento da biomassa residual na cadeia do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Os dados apresentados na Figura 6 evidenciam a magnitude da biomassa residual gerada pela cafeicultura. No Brasil, o processamento por via seca pode gerar aproximadamente 1 kg de casca para cada 1 kg de grão beneficiado. Além disso, estima-se a geração anual de cerca de três milhões de toneladas de polpa, 816 mil toneladas de mucilagem e 421 mil toneladas de pergaminho na cadeia cafeeira nacional (Tsigkou *et al.*, 2025). Esses números reforçam o enorme potencial de valorização desses materiais em sistemas produtivos sustentáveis e regenerativos.

Dessa forma, os resíduos gerados durante a cadeia produtiva do café necessitam de destinação e tratamento adequados, uma vez que o manejo incorreto pode causar impactos ambientais severos e, em alguns casos, irreversíveis. Além disso, o descarte inadequado representa desperdício de matérias-primas valiosas que poderiam ser reutilizadas na produção de fertilizantes orgânicos, bioenergia, compostagem e outros insumos agrícolas sustentáveis, contribuindo para maior eficiência ambiental, econômica e social da cafeicultura (Figura 7).



Figura 7. Destinação atual e potencial de valorização dos resíduos gerados no processamento do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

As diferentes possibilidades de aproveitamento apresentadas na Figura 7 refletem distintas abordagens de gestão dos resíduos. Enquanto algumas permanecem associadas a fluxos lineares de produção e descarte, outras incorporam princípios da economia circular, promovendo a reinserção dos materiais nos sistemas produtivos.

Os modelos de gestão de resíduos refletem diferentes formas de interação entre os sistemas produtivos e o meio ambiente. No modelo linear, predominante nas cadeias produtivas convencionais, os recursos naturais são extraídos, transformados, consumidos e descartados, gerando elevado volume de resíduos e impactos ambientais. Em contraste, o modelo de regeneração circular busca reinserir os resíduos nos processos produtivos, promovendo o reaproveitamento, a reciclagem e a valorização de subprodutos, reduzindo desperdícios e estimulando a sustentabilidade. Nesse contexto, a Figura 8 apresenta uma comparação entre os modelos de extração linear e regeneração circular, evidenciando suas diferenças quanto ao fluxo de materiais, uso de recursos e destinação dos resíduos.

Dimensão	Modelo Linear (Convencional)	Modelo Circular (Regenerativo)
Fluxo de Insumos	 Importados, baseados em petróleo e sais solúveis.	 Fechado: Biofertilizantes, adubação verde e compostagem local.
Destinação de Resíduos	 Lixo ou passivo ambiental (ex: contaminação de lençóis freáticos).	 Ativo de alto valor (ex: palha rica em Nitrogênio e Potássio retorna ao solo).
Saúde do Solo	 Exaurido , compactado, baixíssima CTC, focado em nutrição da planta.	 Máquina viva, alta CTC , microvida abundante, retém água e húmus.
Perfil Econômico	 Refém de commodities de baixo valor e flutuações de preços globais.	 Resiliente , custos decrescentes a longo prazo, acesso a prêmios (Fair Trade/Especiais).

Figura 8. Comparação entre os modelos de economia linear e regeneração circular na gestão de resíduos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A transição de sistemas produtivos baseados na lógica linear de extração, consumo e descarte para modelos fundamentados na circularidade representa

uma mudança estratégica na forma de produzir e consumir, especialmente em atividades agroindustriais como a cafeicultura. A adoção de práticas circulares permite transformar resíduos orgânicos em insumos úteis, como fertilizantes, compostos orgânicos, bioenergia e novos produtos de valor agregado, contribuindo para a redução da pressão sobre os recursos naturais e para o fortalecimento da economia sustentável. Além dos benefícios ambientais, esse modelo favorece a eficiência produtiva, a geração de renda e a construção de sistemas mais resilientes e alinhados aos princípios da sustentabilidade e da agroecologia (Peron *et al.*, 2026).

Conforme ilustrado na Figura 8, a economia circular busca manter os materiais em ciclos produtivos, reduzindo perdas e impactos ambientais, em contraste com o modelo linear, caracterizado pelo elevado consumo de recursos naturais e pela geração contínua de resíduos. Na cadeia produtiva do café, essa abordagem possibilita o reaproveitamento de cascas, mucilagem, polpa e borra para a produção de fertilizantes, compostos orgânicos, bioenergia e outros produtos de valor agregado, promovendo maior eficiência no uso dos recursos e fortalecendo a sustentabilidade econômica e ambiental do sistema (Souza, 2006; Souza, 2026).

Apesar desse elevado potencial de reaproveitamento, uma parcela significativa dos resíduos gerados na cadeia cafeeira ainda recebe destinação inadequada, favorecendo perdas de recursos e impactos ambientais. Nesse contexto, torna-se necessário compreender os principais efeitos associados ao manejo inadequado desses resíduos, tema abordado na seção seguinte.

2.2. Impactos ambientais dos resíduos gerados na produção do café

A expansão da cafeicultura e o aumento da demanda mundial pela bebida intensificaram a geração de resíduos e os impactos ambientais associados à cadeia produtiva do café. Desde a implantação dos cafezais até as etapas de colheita, beneficiamento, industrialização e consumo, diferentes formas de degradação ambiental podem ser observadas, evidenciando a necessidade de adoção de sistemas produtivos mais sustentáveis e alinhados aos princípios da conservação ambiental e da agroecologia.

Entre os principais problemas ambientais relacionados à cafeicultura, destacam-se a geração excessiva de resíduos sólidos, o descarte inadequado de embalagens plásticas, a contaminação do solo e da água, a emissão de gases de efeito estufa e o elevado consumo de recursos naturais, especialmente água e combustíveis fósseis (Maciel *et al.*, 2020).

Os impactos ambientais da cafeicultura não estão restritos às etapas de beneficiamento e processamento dos frutos. Desde a implantação da lavoura já ocorre a geração de resíduos associados à produção de mudas, ao uso de insumos agrícolas e aos materiais empregados nas atividades de manejo. Entre esses resíduos destacam-se embalagens plásticas, tubetes, sacolas para mudas, recipientes de fertilizantes e defensivos agrícolas, que, quando não recebem destinação adequada, podem permanecer no ambiente por longos períodos. A Figura 9 exemplifica uma das primeiras fontes de geração de resíduos na cadeia produtiva do café, evidenciando o uso de recipientes plásticos durante a fase de formação das mudas.



Figura 9. Uso de recipientes plásticos na produção de mudas de café e potencial geração de resíduos durante a implantação dos cafezais. Fonte: Acervo Maurício Novaes, 2023; Rehagro, 2025.

Segundo Lopes *et al.* (2023), a cafeicultura ocupa posição de destaque entre as atividades agrícolas geradoras de resíduos plásticos, principalmente devido ao uso intensivo de embalagens de fertilizantes, defensivos agrícolas,

sacarias, recipientes de armazenamento, tubetes e sacolas utilizadas na produção de mudas. Grande parte desses materiais, quando descartada inadequadamente, pode permanecer no ambiente por longos períodos, contribuindo para a poluição do solo, dos corpos hídricos e da biota terrestre.

Ao analisar cronologicamente a cadeia produtiva do café, observa-se que os impactos e externalidades ambientais podem ser identificados já na fase de implantação do parque cafeeiro. Em períodos passados, práticas como queimadas eram frequentemente utilizadas para limpeza das áreas destinadas ao cultivo, especialmente em locais com elevada presença de matéria orgânica. Essa prática contribui para a emissão de dióxido de carbono (CO₂), óxidos nitrosos e hidrocarbonetos, substâncias associadas ao agravamento do efeito estufa, à poluição atmosférica e a problemas respiratórios na população (Lopes *et al.*, 2023).

Além disso, durante a implantação das lavouras, resíduos como tubetes, sacolas plásticas e embalagens de mudas frequentemente têm destinação inadequada, sendo abandonados no solo ou descartados incorretamente. Esses materiais podem provocar impactos ambientais persistentes devido à lenta degradação do plástico no ambiente, além de favorecer a formação de microplásticos nos ecossistemas agrícolas (Geyer; Jambeck; Law, 2017).

Após o estabelecimento da lavoura, as etapas de manejo do cafeeiro também representam importante fonte geradora de resíduos e potenciais impactos ambientais. Entre os principais problemas destacam-se o descarte incorreto de embalagens de agrotóxicos, o uso excessivo de fertilizantes químicos, a aplicação desordenada de defensivos agrícolas e o manejo inadequado das caldas pulverizadas. Essas práticas podem causar contaminação do solo, intoxicação de organismos não alvo, redução da biodiversidade e poluição de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Pignati *et al.*, 2017).

Após o estabelecimento da lavoura, as etapas de manejo do cafeeiro também representam importante fonte geradora de resíduos e potenciais impactos ambientais. Entre os principais problemas destacam-se o descarte incorreto de embalagens de agrotóxicos, o uso excessivo de fertilizantes

químicos, a aplicação desordenada de defensivos agrícolas e o manejo inadequado das caldas pulverizadas. Essas práticas podem causar contaminação do solo, intoxicação de organismos não alvos, redução da biodiversidade e poluição de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (*ibidem*).

A intensificação dos sistemas produtivos convencionais frequentemente está associada à simplificação da paisagem agrícola, caracterizada pela redução da diversidade vegetal e pela eliminação de elementos naturais presentes no entorno das lavouras. Essa transformação compromete importantes serviços ecossistêmicos, como a polinização, a ciclagem de nutrientes e o controle biológico natural de pragas. Como consequência, observa-se maior vulnerabilidade dos agroecossistemas a surtos populacionais de organismos fitófagos, favorecendo o aumento do uso de defensivos agrícolas e ampliando os riscos de contaminação ambiental.

Nesse contexto, a manutenção de áreas vegetadas e de componentes arbóreos desempenha papel fundamental na conservação da biodiversidade funcional e na estabilidade ecológica dos sistemas cafeeiros. Em contrapartida, a remoção da vegetação arbórea elimina abrigo, alimento e locais de reprodução para a fauna benéfica, rompendo importantes relações ecológicas e reduzindo a presença de inimigos naturais das pragas. Essa simplificação biológica cria uma dependência crescente de insumos químicos para manter a produtividade agrícola, conforme ilustrado na Figura 10.

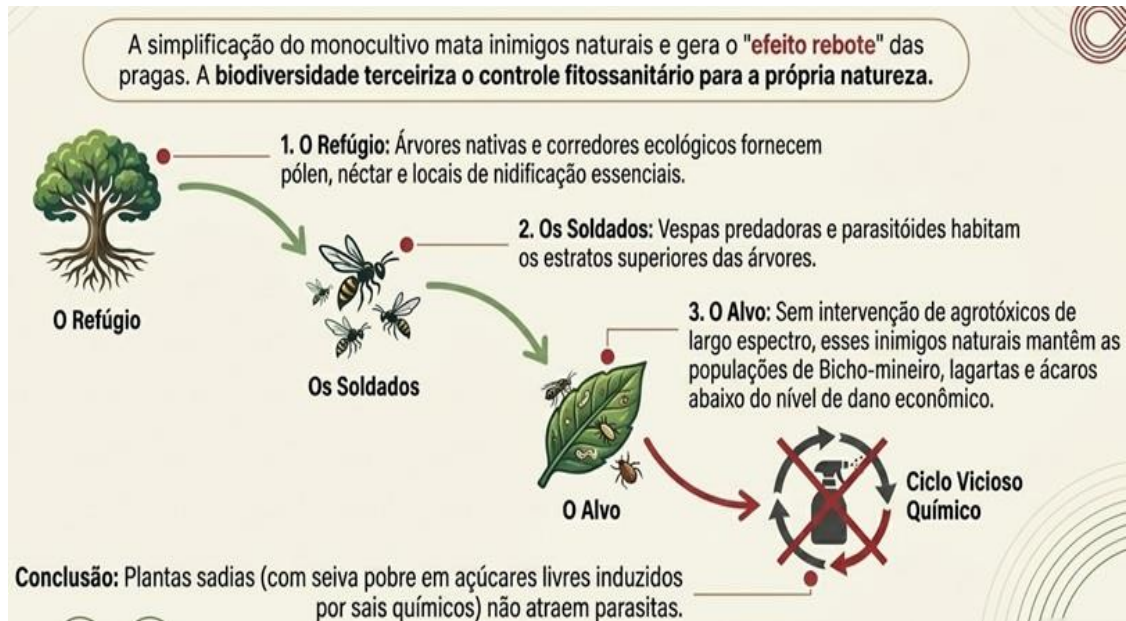


Figura 10. Papel da vegetação arbórea na manutenção do controle biológico e da biodiversidade funcional em cafezais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 10 evidencia que a manutenção de componentes arbóreos na paisagem agrícola favorece a conservação da biodiversidade funcional e fortalece mecanismos naturais de regulação ecológica, como o controle biológico de pragas. Dessa forma, sistemas produtivos mais diversificados tendem a reduzir a dependência de insumos químicos externos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para o equilíbrio dos agroecossistemas cafeeiros.

Outro aspecto relevante refere-se à mecanização agrícola utilizada durante a colheita e o beneficiamento do café. Máquinas movidas a combustíveis fósseis contribuem para a emissão de gases de efeito estufa, especialmente dióxido de carbono (CO_2), intensificando os impactos das mudanças climáticas globais. Além disso, o processamento via úmida demanda elevado consumo hídrico. Segundo Campos *et al.* (2021), podem ser utilizados entre 3 e 5 litros de água para o processamento de 1 litro de café, gerando águas residuárias ricas em matéria orgânica, nutrientes e compostos fenólicos.

Quando essas águas residuárias são descartadas sem tratamento adequado, podem provocar redução do oxigênio dissolvido em corpos hídricos, eutrofização, mortandade de organismos aquáticos e contaminação ambiental.

Esse cenário reforça a importância da adoção de sistemas de tratamento, reutilização da água e manejo sustentável dos resíduos líquidos gerados na pós-colheita do café (Janissen; Huynh, 2018).

Além dos impactos ambientais diretos, o manejo inadequado dos resíduos da cafeicultura também gera consequências sociais e econômicas, como aumento dos custos produtivos, desperdício de biomassa potencialmente aproveitável, riscos à saúde humana e redução da qualidade ambiental das comunidades rurais. Em contrapartida, práticas sustentáveis de manejo e valorização desses resíduos podem contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais, a geração de novos produtos e fontes de renda, o aumento da eficiência no uso dos recursos naturais e a construção de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis, substituindo a lógica linear de descarte pelo paradigma da economia circular (Maciel *et al.*, 2020; Tsigkou *et al.*, 2025).

A crescente preocupação com os impactos ambientais decorrentes da geração de resíduos tem impulsionado a busca por modelos produtivos mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, a economia circular emerge como uma alternativa capaz de substituir a lógica convencional de extração, consumo e descarte por sistemas que priorizam o reaproveitamento de materiais, a reciclagem de recursos e a regeneração dos processos produtivos. Na cafeicultura, essa abordagem permite transformar resíduos anteriormente considerados passivos ambientais em insumos de valor econômico, ambiental e social, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva. A Figura 11 apresenta uma representação conceitual dessa transição.

A Figura 11 evidencia que a adoção dos princípios da economia circular possibilita reduzir a geração de resíduos e ampliar a eficiência no uso dos recursos naturais ao longo da cadeia produtiva do café. Por meio do reaproveitamento de subprodutos como cascas, polpa, mucilagem, pergaminho e borra de café, torna-se possível promover a ciclagem de nutrientes, a geração de energia, a produção de fertilizantes orgânicos e a agregação de valor aos resíduos. Essa mudança de paradigma contribui não apenas para a mitigação dos impactos ambientais, mas também para o fortalecimento da viabilidade econômica e da resiliência dos sistemas produtivos.

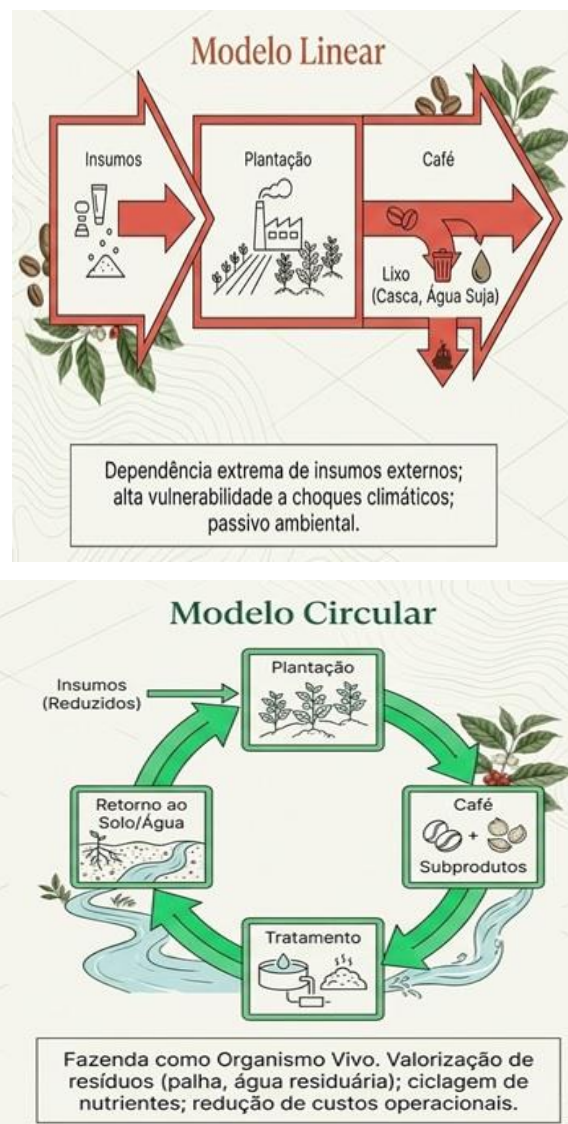


Figura 11. Transição da economia linear para a economia circular na gestão de resíduos da cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, compreender os impactos ambientais gerados ao longo da cadeia produtiva do café é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que promovam o correto gerenciamento dos resíduos, a conservação dos recursos naturais e o fortalecimento de uma cafeicultura ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável.

Fundamentalmente, a transição para modelos produtivos baseados na agroecologia e na economia circular representa um dos principais caminhos para a superação dos gargalos ambientais da cafeicultura moderna. Ao valorizar os

serviços ecossistêmicos, como o controle biológico proporcionado pela biodiversidade funcional, e ao reinserir os subprodutos do processamento no ciclo produtivo, o cafeicultor deixa de ser apenas um gestor de insumos para assumir o papel de gestor de processos ecológicos. Essa mudança de perspectiva contribui para a proteção dos recursos naturais, para a saúde das comunidades rurais e para a resiliência econômica das propriedades frente às instabilidades climáticas e às crescentes exigências do mercado global por produtos de origem ética e sustentável (Silva *et al.*, 2024; Souza; Simão, 2024). Nesse contexto, torna-se essencial compreender as principais estratégias de manejo sustentável capazes de transformar os resíduos da cafeicultura em recursos de valor econômico, ambiental e social.

3. Manejo sustentável dos resíduos gerados na cadeia do café

O manejo sustentável dos resíduos gerados na cadeia produtiva do café constitui uma estratégia fundamental para a redução dos impactos e externalidades ambientais associados à atividade cafeeira. Além de minimizar problemas relacionados à poluição do solo, da água e do ar, o reaproveitamento desses resíduos contribui para o fortalecimento da economia circular, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais e agregando valor aos subprodutos gerados durante a produção e o beneficiamento do café.

A adoção de práticas sustentáveis na cafeicultura pressupõe uma visão sistêmica da propriedade rural, na qual os resíduos deixam de ser considerados passivos ambientais e passam a integrar os fluxos de matéria e energia do agroecossistema. Nesse modelo, os subprodutos gerados durante a produção e o beneficiamento do café podem ser reaproveitados em diferentes processos, promovendo a ciclagem de nutrientes, a melhoria da fertilidade do solo, a conservação dos recursos hídricos e a redução da dependência de insumos externos. Dessa forma, o manejo sustentável dos resíduos contribui simultaneamente para a sustentabilidade ambiental, a eficiência produtiva e a viabilidade econômica da atividade cafeeira (Souza, 2026). A Figura 12 apresenta uma visão integrada dessas estratégias e de suas interações no contexto da propriedade rural.



Figura 12. Fluxo integrado de reaproveitamento de resíduos e práticas sustentáveis na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse contexto, práticas sustentáveis voltadas ao reaproveitamento de resíduos orgânicos, líquidos e sólidos vêm ganhando destaque na cafeicultura moderna, especialmente em sistemas produtivos agroecológicos e conservacionistas. Entre as principais alternativas utilizadas destacam-se a compostagem, o uso de cobertura morta, a produção de biofertilizantes, a reutilização da água residuária, a geração de energia a partir da biomassa, a implantação de sistemas agroflorestais (SAFs) e a aplicação de resíduos orgânicos para a melhoria da qualidade física, química e biológica do solo (Murthy; Naidu, 2012; Silva; Souza, 2021). Como evidenciado na Figura 12, a integração dessas estratégias no cotidiano da propriedade configura um ciclo de aproveitamento que otimiza o fluxo de nutrientes e energia.

Além dos benefícios ambientais, o manejo adequado dos resíduos pode reduzir custos produtivos, diminuir a dependência de fertilizantes químicos e fortalecer a sustentabilidade econômica das propriedades cafeeiras. Dessa forma, o aproveitamento dos resíduos gerados ao longo da cadeia do café representa uma importante ferramenta para promover sistemas agrícolas mais resilientes, sustentáveis e alinhados às exigências ambientais contemporâneas.

Entre os materiais com maior potencial de reaproveitamento destacam-se a casca e o pergaminho do café, resíduos lignocelulósicos amplamente disponíveis e com diversas aplicações agronômicas e energéticas.

3.1. Reaproveitamento da casca e pergaminho

Como abordado anteriormente, grande parte dos resíduos gerados na cadeia produtiva do café é proveniente das etapas de pós-colheita, destacando-se principalmente a casca, a polpa e o pergaminho. Esses materiais representam parcela significativa da biomassa residual produzida durante o beneficiamento dos frutos, tornando indispensável a adoção de estratégias adequadas de destinação e reaproveitamento.

A utilização de subprodutos da cafeicultura na agricultura apresenta-se como uma estratégia eficaz para a manutenção da matéria orgânica e para a melhoria da qualidade do solo. O aporte de casca e polpa de café favorece a reestruturação física e o equilíbrio químico do sistema. De acordo com Carvalho *et al.* (2009) e ABD Manan; Mohd Rozali; Azmi (2024), a utilização de polpa estabilizada incrementa o pH e a capacidade de troca catiônica (CTC), além de fortalecer a agregação do solo. Verificou-se que essa prática eleva substancialmente a disponibilidade de macronutrientes (N, P, S e Mg) e micronutrientes (Fe), bem como os estoques de carbono, consolidando os resíduos cafeeiros como importantes condicionadores de solo.

Entretanto, a viabilidade dessas práticas deve ser analisada não apenas sob a perspectiva agronômica, mas também em função da realidade socioeconômica das propriedades rurais. Nesse contexto, a Figura 13 sintetiza os resultados obtidos em estudos conduzidos pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Santo Antônio do Amparo, MG, estabelecendo um comparativo entre a Agricultura Empresarial, representada pela Fazenda Nossa Senhora da Guia (NKG), e a Agricultura Familiar, vinculada ao Projeto PX. A matriz relaciona os diferentes resíduos e condicionadores de solo aos seus impactos físicos, químicos e biológicos, bem como à sua viabilidade de adoção em distintos modelos produtivos (Carvalho *et al.*, 2009).

Matriz de Diagnóstico		
Condicionador	Impacto no Solo (CTC e pH)	Aderência e Escala
Casca de Café (Palha)	Melhora estrutural contínua.	Uso preferencial orgânico ou energia para secadores.
Biochar	Aumentou a CTC a pH 7.0 em 12% .	Maior impacto na produtividade familiar.
Composto Orgânico	Aumentou a CTC em 17% (em relação ao controle).	Alta eficácia biológica.
COMBI (Composto + Biochar)	Aumento significativo de saturação de bases (V) e CTC.	Ideal para agricultura empresarial de larga escala.

 **Insight:** A matéria orgânica circular não apenas nutre, mas reestrutura biologicamente o solo.

Figura 13. Valoração agronômica de resíduos cafeeiros como condicionadores de solo em diferentes modelos produtivos. Fonte: Adaptado de estudos da UFLA em Santo Antônio do Amparo, MG, por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA NotebookLM).

A matriz correlaciona os diferentes condicionadores de solo aos seus respectivos impactos físicos, químicos e biológicos, avaliando não apenas a melhoria de fertilidade, mas também a aderência e escala de cada prática. Enquanto no modelo empresarial da NKG o foco reside na mecanização e no ganho de escala para grandes extensões, no modelo familiar do Projeto PX a valoração enfatiza a autonomia do produtor e o uso intensivo de recursos locais. Essa análise comparativa é fundamental para demonstrar que, embora as respostas do solo aos macronutrientes (N, P, S, Mg) e micronutrientes (Fe) sejam consistentes, a estratégia de aplicação e o gerenciamento dos resíduos devem ser personalizados para garantir a sustentabilidade econômica em ambas as escalas (Carvalho *et al.*, 2009).

Além do enriquecimento nutricional, a utilização de cascas e pergaminhos como cobertura morta contribui para a conservação da umidade do solo, redução da erosão, controle da temperatura e diminuição da emergência de plantas espontâneas. Tais benefícios favorecem a sustentabilidade dos sistemas produtivos e reduzem a necessidade de utilização intensiva de insumos químicos externos (Silva; Souza, 2021).

Os benefícios da compostagem vão além da simples redução do volume de resíduos destinados ao descarte. Durante o processo de decomposição, ocorre a estabilização da matéria orgânica e a concentração de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, resultando em um insumo capaz de melhorar a fertilidade e a qualidade do solo. Estudos recentes demonstram que a combinação de compostos orgânicos com materiais carbonizados, como o biochar, potencializa ainda mais esses efeitos, favorecendo a retenção de nutrientes e aumentando a eficiência dos processos biológicos e químicos do solo (Lehmann *et al.*, 2011; Mussatto *et al.*, 2011; Lehmann; Joseph, 2015). A Figura 14 apresenta resultados experimentais que evidenciam o impacto desses condicionadores sobre atributos relacionados à fertilidade edáfica.

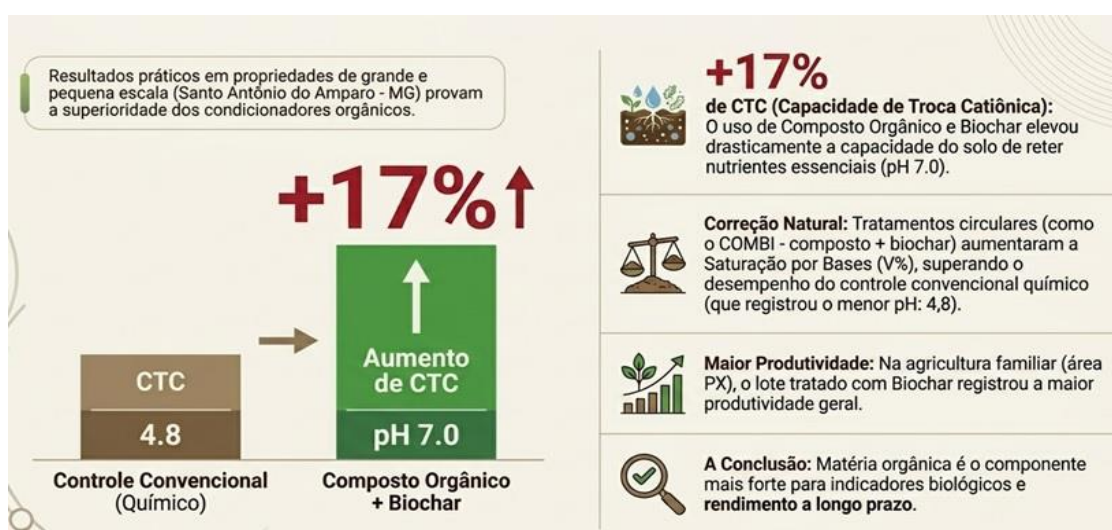


Figura 14. Efeitos da aplicação de compostos orgânicos e biochar sobre a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo. Fonte: Adaptado de estudos da UFLA em Santo Antônio do Amparo, MG, por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA NotebookLM).

Como demonstrado na Figura 14, dados experimentais reforçam a eficiência do aproveitamento agrônomo dos resíduos cafeeiros, evidenciando que a associação entre compostos orgânicos e biochar promove incrementos significativos na capacidade de troca catiônica (CTC) do solo quando comparada ao uso exclusivo de fertilizantes convencionais. Esse resultado indica maior potencial de retenção e disponibilização de nutrientes às plantas, além de

contribuir para a melhoria da qualidade química do solo e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Zhao *et al.*, 2025).

Além da utilização agrícola, a casca e outros resíduos provenientes do processamento do café também apresentam elevado potencial para geração de energia renovável. Estudos recentes indicam que esses resíduos podem ser utilizados como biomassa para produção de *pellets*, briquetes e biochar destinados à geração de energia térmica. Essa alternativa contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e amplia o aproveitamento energético de subprodutos agrícolas, fortalecendo a sustentabilidade da cadeia produtiva do café (Murthy; Naidu, 2012; Medina *et al.*, 2025) (Figura 15).

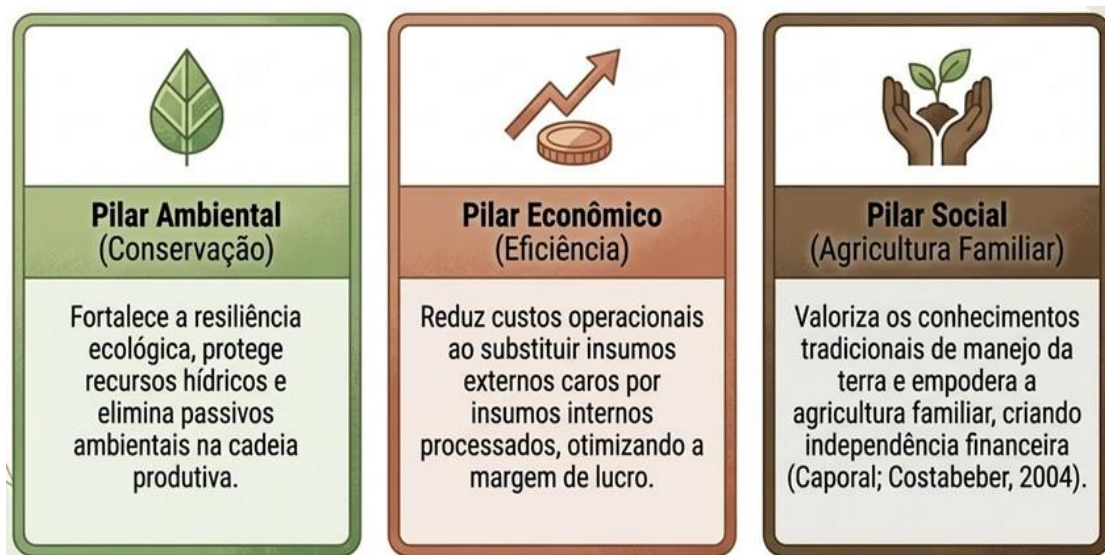


Figura 15. O impacto sistêmico da valorização de resíduos: integração dos benefícios econômicos, ambientais e sociais na cafeicultura moderna. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Como ilustrado na Figura 15, os benefícios decorrentes da valorização dos resíduos cafeeiros extrapolam os limites da produção agrícola e alcançam diferentes setores produtivos. Outro aspecto relevante refere-se ao potencial biotecnológico desses resíduos. Pesquisas recentes demonstram que cascas, polpas e pergaminhos podem ser utilizados na produção de enzimas, substratos para cultivo de microrganismos, extração de compostos antioxidantes e fabricação de materiais biodegradáveis, ampliando as possibilidades de valorização econômica e ambiental dos resíduos cafeeiros (Pandey *et al.*, 2000; Gomes *et al.*, 2021; 2022). Essa visão multifacetada evidencia que o manejo de

resíduos transcende a operação agrícola, consolidando-se como um fator de impacto sistêmico que harmoniza ganhos produtivos, preservação ecossistêmica e desenvolvimento humano.

Dessa forma, torna-se evidente a importância do reaproveitamento sustentável da casca e do pergaminho na cadeia produtiva do café. Além de contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado desses resíduos, sua reutilização promove benefícios agronômicos, econômicos e energéticos, fortalecendo práticas sustentáveis e incentivando modelos de produção agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

Entre os diferentes resíduos gerados na cafeicultura, destacam-se também os efluentes líquidos produzidos durante o processamento dos frutos. Em razão de seu elevado potencial poluidor e do grande volume gerado, a água residuária demanda estratégias específicas de manejo e reaproveitamento, conforme discutido na seção seguinte.

3.2. Reaproveitamento da água residuária gerada no processamento via úmida

Como descrito anteriormente, o processamento dos frutos do café pode ocorrer por via seca ou via úmida. No processamento via úmida, amplamente utilizado na produção de cafés especiais para garantir maior uniformidade e qualidade sensorial, ocorre um elevado consumo de água durante as etapas de lavagem, despolpa, desmucilagem e transporte hidráulico dos frutos. Em função dessa intensa demanda hídrica, gera-se um grande volume de efluentes líquidos, caracterizados por uma carga poluidora complexa, composta por matéria orgânica em suspensão, açúcares, compostos fenólicos e uma variedade de nutrientes minerais (Matos, 2008; Soares *et al.*, 2008; Matos *et al.*, 2017).

A complexidade química dessa água residuária reside no fato de que o processo de fermentação e desmucilagem liberam substâncias recalcitrantes e reduz drasticamente o pH do efluente. Se descartada sem o devido tratamento ou monitoramento, essa mistura pode desencadear sérios danos ambientais, como a degradação da estrutura física do solo e a contaminação severa de

lençóis freáticos e mananciais superficiais. A introdução direta desses resíduos em corpos d'água provoca a rápida redução do oxigênio dissolvido, a proliferação desordenada de microrganismos e o processo de eutrofização, comprometendo a biodiversidade aquática (Matos, 2008; Matos *et al.*, 2017; Campos *et al.*, 2021).

Entretanto, o que inicialmente se configura como um passivo ambiental pode ser reconfigurado como um recurso valioso dentro do ecossistema produtivo. Devido à alta concentração de nutrientes essenciais às plantas, como potássio, nitrogênio e fósforo, o reaproveitamento dessa água por meio da fertirrigação ou de sistemas de tratamento biológico torna-se uma alternativa sustentável e economicamente viável. Essa prática não apenas reduz a necessidade de fertilizantes minerais sintéticos, mas também promove a reciclagem de nutrientes e a conservação das fontes hídricas, alinhando a cafeicultura aos modernos preceitos da economia circular (Janissen; Huynh, 2018).

Antes de seu reaproveitamento agrícola ou tratamento, a água residuária gerada durante o processamento do café necessita ser coletada e armazenada adequadamente, evitando sua liberação direta no ambiente. A Figura 16 apresenta tanques utilizados para o armazenamento temporário desse efluente, etapa fundamental para viabilizar seu tratamento e posterior utilização em práticas sustentáveis de manejo.



Figura 16. Tanques com água residuária resultante do processo de descascamento do café cereja. Fonte: Prezotti *et al.*, 2012.

Segundo Soares *et al.* (2007), a gestão hídrica no pós-colheita é um fator determinante para a eficiência operacional da propriedade, e a água utilizada no processamento do café pode receber diferentes destinações. Entre as estratégias de manejo, destacam-se a recirculação no próprio sistema de beneficiamento, o encaminhamento para unidades de tratamento para descarte controlado e, de forma crescente, o reaproveitamento estratégico em áreas agrícolas. Essas opções visam mitigar o volume de efluentes brutos gerados, aperfeiçoando o balanço hídrico da unidade processadora.

A implantação de sistemas de circuito fechado permite que a água de lavagem e despulpa retorne ao processo inicial após passar por filtros e decantadores, o que reduz drasticamente a captação em fontes naturais (Figura 17). Essa prática de recirculação, além de economizar recursos, concentra a carga orgânica no efluente final: embora demande um gerenciamento mais criterioso, facilita a posterior recuperação de subprodutos e minimiza a dispersão de poluentes no ambiente imediato.



Figura 17. Utilização de tanques de decantação de resíduos e uso de filtro ecológico para retenção de partículas. Fonte: Soares *et al.*, 2012.

A Figura 17 evidencia a importância das estruturas de tratamento primário na gestão sustentável dos efluentes gerados durante o processamento do café.

Os tanques de decantação e os filtros ecológicos atuam na retenção de sólidos suspensos e na redução da carga orgânica, permitindo que a água seja reutilizada de forma mais segura ou encaminhada para etapas complementares de tratamento. Essas tecnologias contribuem para a redução do consumo hídrico, minimizam os riscos de contaminação ambiental e favorecem o aproveitamento racional dos recursos disponíveis na propriedade.

Sob essa ótica, a reutilização da água residuária na fertirrigação consolida-se como uma técnica de elevada sinergia produtiva, apresentando potencial para reduzir o desperdício hídrico e diminuir a dependência de fertilizantes minerais sintéticos. Ao transformar o efluente em uma fonte de nutrientes e água para o cafezal, o produtor promove o fechamento do ciclo biogeoquímico na propriedade. Tal abordagem não apenas favorece a sustentabilidade da atividade cafeeira em longo prazo, mas também atende às rigorosas exigências de conformidade ambiental e certificações de mercado (Janissen; Huynh, 2018; Mantovani; Bernardo; Soares, 2021).

Em estudo realizado em propriedades cafeeiras no estado do Espírito Santo, Prezotti *et al.* (2012) observaram resultados satisfatórios quanto aos teores nutricionais presentes na água residuária proveniente do processamento dos frutos do café (Tabela 1).

Tabela 1. Teores máximos, mínimos e médios de nutrientes em amostras de águas residuárias coletadas em lagoas de deposição de 40 propriedades da Região produtora de café arábica do ES

Limites dos teores dos nutrientes	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	B
Máximo (mg L ⁻¹)	205	23	875	94	28	40	44	80	28	12
Mínimo (mg L ⁻¹)	1,5	1	1,5	1	1	1	1	1	0,3	1
Médio (mg L ⁻¹)	106	5	225	30	9	2	3	5	31	1
Desvio padrão	63	6	202	22	8	11	12	22	127	4
CV (%)	60	137	97	73	83	459	444	447	406	366

Fonte: Adaptado de Prezotti *et al.*, 2012.

A Tabela 1 evidencia elevada variabilidade na composição química da água residuária do café, especialmente para micronutrientes como Cu, Zn, Mn, Fe e B, que apresentaram coeficientes de variação superiores a 300%. Destaca-se ainda a elevada concentração de potássio (K), com valor médio de 225 mg L⁻¹ e máximos de até 875 mg L⁻¹, reforçando o potencial da água residuária como fonte complementar de nutrientes em sistemas de fertirrigação. Entretanto, a ampla variação observada entre as amostras indica a necessidade de monitoramento prévio da composição química antes de sua aplicação agrícola, de modo a evitar desequilíbrios nutricionais e riscos de contaminação ambiental.

Nesse contexto, o reaproveitamento da água residuária pode representar uma importante estratégia para o fornecimento de nutrientes às culturas agrícolas, especialmente em sistemas cafeeiros. Prezotti *et al.* (2012) ressaltam que sua utilização deve priorizar o aporte nutricional, devendo as doses ser definidas com base em análises químicas do efluente e nas exigências da cultura, de forma a garantir eficiência agrônômica e segurança ambiental.

Além disso, os autores destacam a importância da distribuição homogênea da água residuária nas áreas agrícolas, prevenindo o acúmulo excessivo em determinados pontos da lavoura. O manejo inadequado pode favorecer processos de anaerobiose, proliferação de microrganismos indesejáveis e redução da capacidade de absorção de nutrientes pelas plantas, comprometendo a eficiência do sistema de fertirrigação.

Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de sistemas complementares de tratamento e armazenamento da água residuária antes de sua aplicação no solo. Tecnologias como lagoas de estabilização, biodigestores, filtros biológicos e sistemas de decantação têm sido utilizadas para reduzir a carga orgânica e minimizar os riscos ambientais associados ao uso inadequado desse resíduo (Matos *et al.*, 2017).

Além das formas tradicionais de reaproveitamento, o manejo sustentável da água residuária da cafeicultura também está diretamente relacionado aos princípios da economia circular. Nesse modelo produtivo, os resíduos deixam de ser considerados descartes e passam a ser reinseridos nos ciclos produtivos como insumos de valor agregado. Assim, a reutilização da água residuária

contribui não apenas para a redução dos impactos ambientais, mas também para maior eficiência no uso dos recursos naturais e fortalecimento da sustentabilidade na cadeia produtiva do café. A integração dessas estratégias de tratamento, armazenamento e reaproveitamento evidencia que a gestão da água residuária ultrapassa a simples mitigação de impactos ambientais, configurando-se como um componente estratégico da economia circular na cafeicultura (Figura 18).

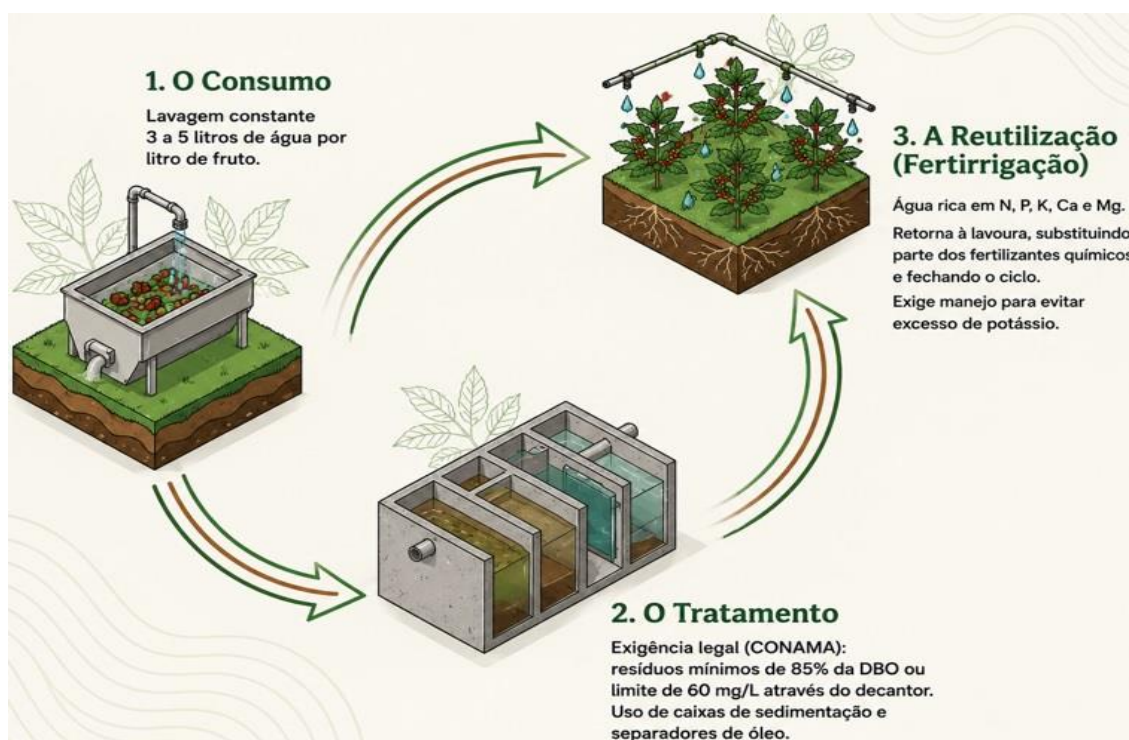


Figura 18. Gestão circular da água residuária: estratégias de tratamento e reaproveitamento na cadeia produtiva do café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, o reaproveitamento adequado da água residuária proveniente do processamento via úmida constitui uma importante alternativa sustentável para a cafeicultura, promovendo conservação hídrica, ciclagem de nutrientes, redução de custos produtivos e mitigação dos impactos ambientais associados à produção cafeeira. Essa abordagem reconfigura a percepção dos efluentes, transformando-os de passivos ambientais em insumos estratégicos para a produção agrícola, o que fortalece a resiliência dos agroecossistemas

frente à escassez de recursos e consolida o compromisso da cadeia cafeeira com os princípios da governança ambiental e da economia circular.

Os exemplos apresentados nas seções anteriores demonstram que o manejo sustentável dos resíduos cafeeiros transcende a simples destinação adequada de materiais, gerando benefícios que se estendem às dimensões ambiental, social e econômica da atividade. Esses impactos positivos são discutidos de forma integrada na seção seguinte.

4. Benefícios ambientais, sociais e econômicos do manejo sustentável dos resíduos gerados na cafeicultura

Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a cadeia produtiva do café gera expressivas quantidades de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos. Entretanto, quando manejados adequadamente, esses resíduos deixam de representar apenas um passivo ambiental e passam a constituir importantes recursos para a sustentabilidade da atividade cafeeira. Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos provenientes da cafeicultura apresenta benefícios ambientais, sociais e econômicos, fortalecendo sistemas produtivos mais resilientes e alinhados aos princípios da economia circular e da agroecologia.

Do ponto de vista ambiental, o manejo sustentável dos resíduos contribui significativamente para a redução da poluição do solo, da água e do ar. A reutilização de cascas, pergaminhos, polpas e águas residuárias diminui o descarte inadequado desses materiais no ambiente, reduzindo riscos de contaminação ambiental, proliferação de microrganismos e emissão de gases de efeito estufa (Maciel *et al.*, 2020). Além disso, o aproveitamento desses resíduos favorece a ciclagem de nutrientes e a conservação dos recursos naturais, promovendo maior equilíbrio ecológico nos sistemas agrícolas.

Entre os principais benefícios ambientais proporcionados pelo reaproveitamento dos resíduos cafeeiros destacam-se a utilização de fertilizantes naturais e biofertilizantes, a redução da dependência de fertilizantes químicos sintéticos e o reaproveitamento de resíduos orgânicos que, de outra forma, seriam descartados no ambiente. Essas práticas contribuem diretamente para a melhoria da fertilidade e da estrutura física do solo, favorecendo a

conservação da umidade, a redução dos processos erosivos e o aumento da atividade biológica. Adicionalmente, o manejo sustentável dos resíduos auxilia na redução da emissão de poluentes e gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que fortalece práticas agroecológicas e conservacionistas voltadas à manutenção da qualidade ambiental e da sustentabilidade dos agroecossistemas cafeeiros (ECOCERT, 2023).

No âmbito econômico, o manejo sustentável dos resíduos pode proporcionar redução significativa dos custos de produção, especialmente devido à menor necessidade de aquisição de fertilizantes minerais, corretivos e outros insumos agrícolas externos. Além disso, resíduos como cascas, pergaminhos e águas residuárias podem ser reaproveitados na geração de energia, compostagem e fertirrigação, agregando valor aos subprodutos da cafeicultura e ampliando as possibilidades de renda nas propriedades rurais (Murthy; Naidu, 2012; Zampieri *et al.*, 2021).

Outro aspecto importante refere-se à melhoria da produtividade e da qualidade dos grãos. Segundo o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2022), práticas de manejo sustentáveis associadas à nutrição equilibrada das plantas favorecem o desenvolvimento adequado das lavouras, refletindo em maior produtividade, qualidade sensorial da bebida e valorização comercial do café produzido.

Sob a perspectiva social, a adoção de práticas sustentáveis na gestão dos resíduos contribui para melhores condições de trabalho, fortalecimento da agricultura familiar e promoção da conscientização ambiental no meio rural. A valorização do reaproveitamento de resíduos também estimula processos educativos voltados à sustentabilidade, incentivando produtores e comunidades rurais a adotarem práticas ambientalmente responsáveis.

Além disso, sistemas sustentáveis de manejo podem contribuir para a geração de emprego e renda em atividades relacionadas à compostagem, produção de biofertilizantes, reciclagem, geração de energia renovável e comercialização de produtos sustentáveis derivados da cafeicultura.

A integração dos benefícios ambientais, econômicos e sociais demonstra que o manejo sustentável dos resíduos cafeeiros transcende a simples mitigação

de impactos ambientais. Quando incorporados aos princípios da economia circular e da agroecologia, os resíduos passam a desempenhar funções estratégicas na geração de renda, na conservação dos recursos naturais e no fortalecimento da sustentabilidade das propriedades rurais. Dessa forma, a comparação entre os modelos convencionais de descarte e os sistemas de reaproveitamento permite compreender de maneira mais ampla os ganhos associados à valorização desses subprodutos ao longo da cadeia produtiva do café (Figura 19).



Figura 19. Benefícios ambientais, sociais e econômicos da valorização dos resíduos na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 19 evidencia que a transição do modelo linear de produção para abordagens fundamentadas na agroecologia e na economia circular promove benefícios que extrapolam a esfera ambiental. A valorização dos resíduos contribui simultaneamente para a redução de custos, geração de oportunidades econômicas, fortalecimento da agricultura familiar e conservação dos recursos naturais, consolidando uma abordagem integrada de sustentabilidade para a cafeicultura.

Tais iniciativas fortalecem o desenvolvimento rural sustentável e ampliam a inserção da cafeicultura em mercados consumidores cada vez mais exigentes quanto às práticas ambientais adotadas na produção agrícola. Dessa forma, o

manejo sustentável dos resíduos gerados na cafeicultura constitui uma importante estratégia para promover equilíbrio entre produção agrícola, conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico.

A adoção dessas práticas contribui não apenas para a mitigação dos impactos e externalidades ambientais associados à atividade cafeeira, mas também para a construção de sistemas produtivos mais eficientes, sustentáveis e comprometidos com as futuras gerações. Entre as principais estratégias capazes de potencializar esses benefícios destacam-se as práticas agroecológicas, que promovem a redução, reutilização e valorização dos resíduos ao longo da cadeia produtiva do café.

5. Práticas agroecológicas e a redução e utilização de resíduos

A agroecologia tem se consolidado como uma importante alternativa para promover sistemas agrícolas mais sustentáveis, resilientes e ambientalmente equilibrados. Na cafeicultura, os princípios agroecológicos contribuem diretamente para a redução da geração de resíduos e para o reaproveitamento sustentável dos materiais produzidos ao longo da cadeia produtiva (Figura 20).



Figura 20. Integração entre reaproveitamento de resíduos e ciclagem de nutrientes em sistemas agroecológicos cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 20 ilustra como os princípios agroecológicos promovem a integração entre produção, reaproveitamento de resíduos e ciclagem de nutrientes, transformando os subprodutos da cafeicultura em recursos capazes de sustentar os processos ecológicos e produtivos do agroecossistema.

Essa abordagem busca integrar conservação ambiental, valorização dos recursos naturais, redução da dependência de insumos externos e fortalecimento da sustentabilidade econômica e social no meio rural. Essa dinâmica de integração permite converter o que seriam perdas em fluxos de energia e biomassa para o sistema (Altieri, 2012; Souza, 2026).

Diferentemente dos modelos convencionais de produção agrícola, a agroecologia propõe práticas que favorecem a ciclagem de nutrientes, o aumento da biodiversidade e o aproveitamento integral da biomassa produzida nos sistemas agrícolas. Nesse contexto, resíduos como cascas, polpas, pergaminhos e águas residuárias do café passam a ser compreendidos como recursos com potencial agrônomo e ecológico, deixando de representar apenas passivos ambientais (Gliessman, 2015; Peron *et al.*, 2026a; 2026b).

Entre as principais práticas agroecológicas aplicadas à cafeicultura destaca-se a compostagem dos resíduos orgânicos gerados na pós-colheita. A utilização de cascas, polpas e restos vegetais na produção de composto orgânico favorece o aumento da matéria orgânica do solo, melhora a retenção de água, amplia a disponibilidade de nutrientes e reduz a necessidade de fertilizantes químicos (Silva; Souza, 2021; Peron *et al.*, 2026a). Além disso, o uso de compostos orgânicos contribui para o fortalecimento da atividade biológica do solo e para a recuperação de áreas degradadas.

Outra prática importante refere-se ao uso de cobertura morta com resíduos cafeeiros. A aplicação de cascas e pergaminhos sobre o solo auxilia na conservação da umidade, redução da erosão, controle de plantas espontâneas e manutenção da temperatura do solo, proporcionando melhores condições para o desenvolvimento das culturas agrícolas (Murthy; Naidu, 2012; Crespo *et al.*, 2021; Crespo; Souza, 2022).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) também representam importante estratégia agroecológica na cafeicultura sustentável. A integração entre

cafeeiros, espécies arbóreas e outras culturas agrícolas favorece a ciclagem de nutrientes, aumenta a biodiversidade e reduz a necessidade de insumos externos, favorecendo e ampliando a prestação de serviços ecossistêmicos. Além disso, resíduos vegetais produzidos nesses sistemas podem ser reincorporados ao solo, fortalecendo os processos naturais de decomposição e fertilização (Nair, 2011; Silva *et al.*, 2021).

Sob a perspectiva agroecológica, os SAFs operam como sistemas de elevada eficiência ecológica, nos quais diferentes estratos vegetais atuam de forma complementar na captura, armazenamento e reciclagem de nutrientes. A deposição contínua de serapilheira, composta por folhas, galhos finos, flores, frutos e resíduos de poda, promove a formação de cobertura orgânica sobre o solo, reduzindo perdas por erosão e favorecendo a atividade dos organismos decompositores.

Esse processo intensifica a ciclagem de nutrientes e amplia a disponibilidade de matéria orgânica, contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo e para a redução da dependência de fertilizantes externos. A Figura 21 ilustra como a arquitetura dos sistemas agroflorestais favorece a circulação de biomassa e nutrientes, transformando resíduos vegetais em recursos estratégicos para a sustentabilidade do agroecossistema.

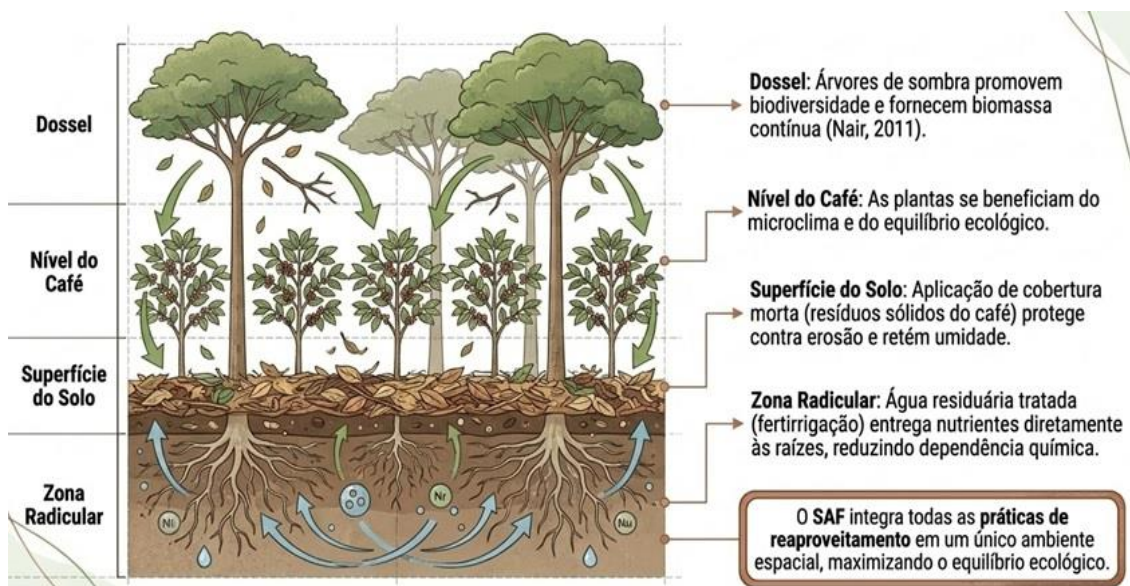


Figura 21. Sistemas agroflorestais e a ciclagem de biomassa e nutrientes na cafeicultura sustentável. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

No contexto do manejo hídrico, práticas agroecológicas incentivam o reaproveitamento da água residuária provenientes do processamento via úmida do café, desde que realizado de forma técnica e ambientalmente seguro. O uso racional desse resíduo na fertirrigação contribui para a redução do desperdício de água e para o aproveitamento de nutrientes presentes no efluente, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais (Prezotti *et al.*, 2012; Mantovani; Bernardo; Soares, 2021).

Além dos benefícios ambientais, a agroecologia promove impactos e externalidades positivos nas dimensões social e econômica da cafeicultura. Segundo Caporal e Costabeber (2004), sistemas agroecológicos fortalecem a agricultura familiar, incentivam a autonomia dos produtores rurais e valorizam conhecimentos tradicionais associados ao manejo sustentável da terra.

Essa abordagem sistêmica permite que o agricultor deixe de ser um mero aplicador de pacotes tecnológicos externos para se tornar um gestor de processos ecológicos, o que favorece a segurança alimentar e a soberania das famílias no campo. A redução da dependência de fertilizantes e defensivos químicos, ao mitigar riscos ocupacionais e contaminações, contribui diretamente para a melhoria da qualidade de vida e a saúde das comunidades rurais (Figura 22).



Figura 22. Representação sistêmica de uma unidade produtiva agroecológica: integração entre gestão, solo e ecossistema. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A Figura 22 ilustra a lógica integrada dos sistemas agroecológicos, nos quais solo, plantas, biodiversidade, recursos hídricos e gestão da propriedade atuam de forma interdependente. Nessa perspectiva, a eficiência produtiva deixa de depender exclusivamente de insumos externos e passa a ser construída a partir do fortalecimento dos processos ecológicos, da ciclagem de nutrientes e da valorização dos recursos disponíveis na própria unidade produtiva.

Sob a ótica da sustentabilidade multidimensional, o manejo agroecológico atua como indutor de resiliência econômica, tornando a propriedade rural menos vulnerável às oscilações dos preços dos insumos sintéticos. Conforme Souza (2026), a transição para modelos produtivos de base ecológica exige não apenas mudanças técnicas, mas uma nova perspectiva de gestão ambiental, baseada na ciclagem de nutrientes e na valorização dos recursos locais para garantir a viabilidade da atividade agrícola em longo prazo. Assim, a cafeicultura sustentável consolida-se como um modelo de desenvolvimento rural que integra eficiência produtiva, inclusão social e justiça ambiental.

Outro aspecto relevante é a crescente valorização de cafés produzidos sob práticas sustentáveis e agroecológicas. Consumidores e mercados internacionais demonstram maior interesse por produtos associados à conservação ambiental, à responsabilidade social e à redução dos impactos ambientais, agregando valor à produção cafeeira (FAO, 2023). Esse cenário exige uma gestão integrada que harmonize produção, qualidade do solo e conservação ambiental, pilares da resiliência da cafeicultura (Figura 23).

A Figura 23 sintetiza os principais pilares que sustentam a transição para modelos mais resilientes de produção cafeeira. A integração entre gestão econômica eficiente, reaproveitamento de resíduos por meio da economia circular e fortalecimento dos serviços ecossistêmicos proporcionados pelos sistemas agroecológicos e agroflorestais permite ampliar simultaneamente a sustentabilidade ambiental, a viabilidade econômica e a inclusão social no meio rural. Essa abordagem integrada evidencia que a competitividade futura da cafeicultura dependerá cada vez mais da capacidade de harmonizar produtividade, conservação dos recursos naturais e geração de valor ao longo da cadeia produtiva.



Figura 23. Pilares da cafeicultura sustentável: integração entre gestão econômica, economia circular e sistemas agroflorestais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, as práticas agroecológicas configuram-se como importantes ferramentas para a redução, reutilização e valorização dos resíduos gerados na cadeia produtiva do café. Ao promover a integração entre produção agrícola, conservação ambiental e ciclagem de nutrientes, a agroecologia contribui para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, eficientes e comprometidos com o equilíbrio ecológico, a segurança produtiva e o desenvolvimento rural de longo prazo.

6. Considerações

Diante da posição estratégica ocupada pelo Brasil na cadeia produtiva mundial do café, tanto como principal produtor e exportador quanto como um dos maiores consumidores da bebida, torna-se cada vez mais necessário conciliar eficiência produtiva, competitividade econômica e responsabilidade socioambiental. Nesse contexto, o manejo sustentável dos resíduos gerados na cafeicultura emerge como um dos principais desafios e, simultaneamente, como uma das mais promissoras oportunidades para a construção de sistemas produtivos mais resilientes e alinhados aos princípios do desenvolvimento sustentável.

Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a produção e o processamento do café geram expressivos volumes de resíduos sólidos, líquidos e orgânicos, incluindo cascas, polpas, pergaminhos, borra de café e águas residuárias. Tradicionalmente tratados como passivos ambientais, esses materiais apresentam elevado potencial de valorização quando inseridos em estratégias de economia circular. Sob essa perspectiva, os resíduos deixam de representar um problema associado ao descarte e passam a constituir recursos capazes de retornar ao sistema produtivo na forma de fertilizantes orgânicos, biofertilizantes, condicionadores de solo, fontes de energia renovável e insumos para diferentes processos biotecnológicos.

Os resultados discutidos demonstram que a reutilização da casca, do pergaminho e da água residuária contribui significativamente para a ciclagem de nutrientes, para a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e para a redução da dependência de fertilizantes minerais e outros insumos externos. Além disso, práticas como compostagem, fertirrigação, produção de biochar, cobertura morta e reaproveitamento energético da biomassa fortalecem a eficiência no uso dos recursos naturais e reduzem os impactos e externalidades ambientais associados à atividade cafeeira.

Sob a ótica da agroecologia, verificou-se que o reaproveitamento dos resíduos transcende a simples destinação adequada de materiais. Quando integrado a sistemas agroflorestais (SAFs), à gestão ecológica do solo e ao manejo conservacionista da água, esse processo passa a desempenhar papel estratégico na manutenção dos serviços ecossistêmicos, no aumento da biodiversidade funcional, na conservação dos recursos naturais e na construção de agroecossistemas mais resilientes frente às mudanças climáticas e às oscilações econômicas. Nessa abordagem, o agricultor deixa de atuar apenas como usuário de insumos externos e assume a função de gestor de processos ecológicos, fortalecendo a autonomia produtiva e a sustentabilidade da propriedade rural.

Os benefícios observados não se restringem à dimensão ambiental. A redução de custos produtivos, a agregação de valor aos subprodutos, a geração de novas oportunidades econômicas e o crescente interesse dos mercados consumidores por produtos associados à responsabilidade socioambiental

ampliam a competitividade da cafeicultura sustentável. Paralelamente, a valorização do conhecimento local, a promoção da educação ambiental e o fortalecimento da agricultura familiar evidenciam a relevância social dessas práticas para o desenvolvimento rural.

Por fim, conclui-se que o futuro da cafeicultura sustentável depende da capacidade de integrar gestão econômica, economia circular e inteligência ecológica em uma mesma estratégia produtiva. A valorização dos resíduos gerados ao longo da cadeia do café representa não apenas uma alternativa ambientalmente adequada, mas uma mudança de paradigma capaz de transformar passivos ambientais em ativos produtivos. Dessa forma, o manejo sustentável dos resíduos consolida-se como uma ferramenta estratégica para promover produtividade, conservação ambiental, inclusão social e desenvolvimento rural, contribuindo para uma cafeicultura mais eficiente, regenerativa e comprometida com as demandas das gerações presentes e futuras.

7. Referências

- ABD MANAN, M. A. M. A.; MOHD ROZALI, A. N.; AZMI, S. S. S. Bioconversion of coffee pulp by *Hermetia illucens* larvae for nutrient-rich organic fertilizer. **Chemical Engineering Transactions**, Pisa, v. 117, p. 103-108, 2024.
- ABIC. Associação Brasileira da Indústria de Café. **Indicadores da indústria de café no Brasil 2025**. São Paulo: ABIC, 2025.
- ABIC. Associação Brasileira da Indústria de Café. **O café brasileiro na atualidade**. São Paulo: ABIC, 2021. Disponível em: ABIC. Acesso em: 12 jun. 2025.
- ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.
- BESTETI, P. I. de O.; OLIVEIRA, C. de; CARVALHO, R. C. B.; ADÃO, J. E. A.; LIMA, M. da S. P. L.; AZEVEDO, P. P. M.; SOUZA, M. N. Vantagens da sustentabilidade na produção de café conilon: perspectivas ambientais e de mercado. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura vol. v –**

Cafeicultura Agroecológica. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 227-257. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c8>.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CAMPOS, A. T.; YANAGI JUNIOR, T.; DAMASCENO, F. A.; CAMPOS, A. T. de; MATTIOLI, M. C. Reuso de água residuária na cafeicultura e sustentabilidade ambiental. **Revista Brasileira de Agricultura Sustentável**, Viçosa, v. 11, n. 2, p. 45-58, 2021.

CAMPOS, R. C.; PINTO, V. R. A.; MELO, L. F.; ROCHA, S. J. S. S. da; COIMBRA, J. S. New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: a critical review. **Future Foods**, [S. l.], v. 4, e100058, 2021.

CAMPOS-VEGA, R.; LOARCA-PIÑA, G.; VERGARA-CASTAÑEDA, H. A.; OOMAH, B. D. Spent coffee grounds: a review on current research and future prospects. **Trends in Food Science & Technology**, Cambridge, v. 45, n. 1, p. 24-36, 2015. DOI: 10.1016/j.tifs.2015.04.012.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia e extensão rural:** contribuições para a promoção do desenvolvimento rural sustentável. Brasília: MDA/SAF/DATER, 2004.

CARDOZO, L. G. C.; LOUBACK, G. C.; PEÇANHA, A. L.; CAMPOS, P. A. C.; FIGUEIREDO, A. M.; S; P.; SOUSA, E. A. de; SOUZA, M. N.; CASTRO, A. S. de. Percepção de graduandos da Universidade Federal do Espírito Santo Campus Alegre - ES, em relação aos resíduos sólidos. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, p. e6290, 2024. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/issue/view/40>. DOI: 10.55905/revconv.17n.4-108.

CARVALHO, A. M. de; FAGIOLI, M.; SILVA, C. A.; ACCIOLY, A. M. A. Decomposição de resíduos orgânicos e disponibilização de nutrientes em sistemas de produção de café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 100-110, 2009.

CECAFÉ. Conselho dos Exportadores de Café do Brasil. **Relatório anual das exportações brasileiras de café 2025.** São Paulo: CECAFÉ, 2025.

CRESPO, A. M.; GONCALVES, D. C.; SOUZA, M. N.; ZANUNCIO JUNIOR, J.

S.; COSTA, H.; FAVARATO, L. F.; RANGEL, O. J. P.; ARAUJO, J. B. S. **Manejo da lagarta-do-cartucho do milho (*Spodoptera frugiperda*):** panorama geral das atualizações no controle alternativo. Boletim Técnico 6. 1 ed. VITÓRIA: Edifes, 2021, v. 6, 20 p.

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N. Plantio direto de milho-verde orgânico sobre diferentes plantas de cobertura de verão. In: VARNIER, E.; VIEIRA, L. H. S.; MENINI, L.; SILVEIRA, L. F. V.; SANTOS, M. C. P.; MEIRELES, R. C. (Org.). **Coletânea Multicampi de Trabalhos em Pesquisa, Extensão e Ensino:** IFES Alegre, Itapina e Santa Teresa /– Curitiba: CRV, 2022. 186 p. (Coleção Produção Acadêmica – IFES em Rede, v. 1). 2022. p. 37-38.

DURÁN, C. A. A.; TSUKUI, A.; SANTOS, F. K. F.; MARTINEZ, S. T.; BIZZO, H. R.; REZENDE, C. M. Café: aspectos gerais e seu aproveitamento para além da bebida. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 9, n. 1, p. 107-134, 2017. DOI: 10.21577/1984-6835.20170010.

ECOCERT. **Agricultura sustentável e economia circular na cafeicultura.** França: Ecocert, 2023.

ECOCERT. **O impacto ambiental da produção de café e as vantagens das práticas sustentáveis.** França: Ecocert, 2023. Disponível em: Ecocert. Acesso em: 27 jun. 2025.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The future of food and agriculture:** drivers and triggers for transformation. Rome: FAO, 2023.

FARIA, F. P. S.; MACHADO, P. P.; AZEVEDO, A. L. B. P.; OLIVEIRA, A. de F. M. de; DESTEFANI, J. D.; SOUZA, M. N. Resíduos agrícolas da pecuária leiteira. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas. vol. v.** – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. 348 p. ISBN: 978-65-84548-12-1. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-12-1.c7>

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, Washington, v. 3, n. 7, p. 1-5, 2017.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology:** the ecology of sustainable food systems. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

GOMES, J. P. A.; MOULIN, M. M.; SANTOS JÚNIOR, A. C.; SOUZA, M. N. **Agricultura orgânica e microrganismos eficientes: aumento produtivo de forma sustentável** / João Paulo Andrade Gomes ... [et al.] – Alegre: Edifes acadêmico, 2022. 22 f. il. ISBN: 978-85-8263-584-1 (livro digital). 9788582635841.

GOMES, J. P. A.; SOUZA, M. N.; SANTOS JÚNIOR, A. C.; MOULIN, M. M. Uso de microrganismos eficientes como alternativa para agricultura sustentável: um referencial teórico, p. 340-355, 2021. In: SOUSA, C da S.; LIMA, F. de S.; SABIONI, S. C. **Agroecologia** [livro eletrônico]. Métodos e técnicas para uma agricultura sustentável: volume 5 /Guarujá, SP: Científica Digital, 2021. 372 p.

JANISSEN, B.; HUYNH, T. Coffee processing wastewater management and sustainability. **Environmental Technology Reviews**, London, v. 7, n. 1, p. 1-14, 2018.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. 944 p.

LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.

LOPES, I.; FERREIRA, J. P.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, R. S.; COSTA, A. C. Identification of solid and liquid waste from coffee production and its potential uses: a review. **Revista Delos: Desarrollo Local Sostenible**, Málaga, p. 3625-3646, 2023.

LOPES, R. M. *et al.* Resíduos plásticos e impactos ambientais na cadeia produtiva do café. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 88-104, 2023.

MACIEL, F. S.; HOLANDA, J. N. F. de; LOIOLA, R. L.; MACIEL, L. A. R.; GONÇALVES, V. S. Aplicabilidade de resíduo borra de café como matéria-prima alternativa na obtenção de material cerâmico. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 3., 2020, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: IBEAS, 2020. p. 1-5.

MACIEL, V. G.; FERREIRA, M. de F.; ETCHEPARE, L. M. S.; SOUZA, E. B. R. de; COSTA, J. A. V.; JACOB-LOPES, E. Environmental performance and waste management in the coffee production chain. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 246, art. 119036, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119036>.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; SOARES, A. A. **Manual de Irrigação**. 10. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2021.

MATOS, A. T. de. **Tratamento de resíduos líquidos de salas de preparo via úmida de frutos do cafeeiro**. Viçosa: Editora UFV, 2008. 40 p.

MATOS, A. T. de; CARVALHO, M. P. de; SOARES, E. R.; BORGES, A. C. Tratamento e aproveitamento agrícola de águas residuárias da cafeicultura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 5, p. 1760-1772, 2017.

MEDINA, J.; PANETTIERI, M.; CALABI-FLOODY, M.; PLAZA, C.; KNICKER, H. Biochar and metallic nanoparticle additives in agricultural residues composting modulate the mineralization patterns of end-products when added to tropical soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, n. 2, p. 2261-2274, 2025.

MENDONÇA, G. S.; RODRIGUES, R. M.; OLIMPIO, S. de O.; SANTOS, A. T. B. dos; OLIVEIRA, C. H. R. de; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; SOUZA, M. N. Uso de resíduos orgânicos na formulação de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas da Mata Atlântica. In: SOUZA, M. N. (org.). **Tópicos em Gestão Ambiental: v. 5**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 175-197. ISBN 978-65-84548-45-9. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c5>

MURTHY, P. S.; NAIDU, M. M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 66, p. 45-58, 2012.

MUSSATTO, S. I.; MACHADO, E. M. S.; MARTINS, S.; TEIXEIRA, J. A. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 4, n. 5, p. 661-672, 2011. DOI: [10.1007/s11947-011-0565-z](https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z).

NAIR, P. K. R. Agroforestry systems and environmental quality: introduction. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 40, n. 3, p. 784-790, 2011.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; BRAND, D.; MOHAN, R.; ROUSSOS, S. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 6, n. 2, p. 153-162, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(00\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(00)00084-X).

PERFECT DAILY GRIND. **Coffee by-products and sustainability in coffee production**. 2024. Disponível em: <https://perfectdailygrind.com>. Acesso em: 08 maio 2026.

PERON, I. B.; CARVALHO, R. C. B.; PINTO, G. P.; EGÍDIO, L. S.; VIEIRA, R. C.; SOUZA, M. N. Práticas agroecológicas e orgânicas: soluções sustentáveis para os desafios globais da segurança alimentar. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em agroecologia: vol. v**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026a. p. 01-18. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

PERON, I. B.; EGIDIO, L. S.; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P.; PELUZIO, J. B. E.; ARAUJO JUNIOR, A. C. Transição agroecológica no Sítio Recanto da Serra: do convencional ao sistema orgânico de produção. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em agroecologia vol. v**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026b. p.19-38. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

PIGNATI, W. A.; CARNEIRO, F. F.; ALEXANDRE, L. A.; OLIVEIRA, N. P. de; SOUZA, S. H. de; SOUZA, M. R. de; FERNANDES, C. R.; FACCHINI, L. A. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 10, p. 3281-3293, 2017.

PREZOTTI, L. C.; MORELI, A. P.; SOARES, S. F.; ROCHA, A. C. da. **Teores de nutrientes nas águas residuárias do café e características químicas do solo após sua aplicação**. Vitória: Incaper, 2012. 24 p. (Documentos, 208). Disponível em: Biblioteca Digital Incaper. Acesso em: 27 jun. 2025.

REHAGRO. **Plantio de café: 6 recomendações para a sua lavoura**. 2025. Acesso em: 12 jun. 2025.

SCHWAN, R. F.; VILELA, D. M. **Fermentação do café**: da ciência à prática. Lavras: Ed. dos Autores, 2022.

SEBRAE. **Boas práticas sustentáveis na cafeicultura brasileira**. Brasília: SEBRAE, 2022.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **As características e as vantagens da produção sustentável de café**. Brasília: SEBRAE, 2023. Disponível em: SEBRAE. Acesso em: 27 jun. 2025.

SILVA, J. M. V. de O. da; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P.; LOPES, J. F.; LIMA, M. da S. P. Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural. p. 141-178. 2024. In: SIMÃO, J. B. P.; PELUZIO, J. B. E.; PELUZIO, T. M. de; LIMA, M. da S. P.; BESTETI, P. I. O.; LOPES, A. C.; FERBEK, G. J. V. (Org.). **A cafeicultura do Caparaó**: resultados de pesquisas Vol. VII. Alegre, ES: Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia do Espírito Santo, 2024. 264 p. ISBN: 978-85-8263-867-5. Formato: e-book PDF (livro digital).

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N. **Produção de café orgânico**: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural. 1. ed. Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2021. 72 p.

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N.; RANGEL, O. J. P.; FORNAZIER, M. L.; LOUBACK, G. C.; PIROVANI, G.; SIQUEIRA, C. B. **Sistemas agroflorestais (SAFs) e a cafeicultura**. In: Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural. 1. ed. Meidrum Street, Mauricius: Novas Edições Acadêmicas, 2021, v.1, p. 40-50.

SILVA, M. M. da; SILVA, M. M. da; CARVALHO, C. S.; VIÇOSI, D. B.; SIMÃO, J. B. P.; PERON, I. B.; ALVES, D. I.; CARVALHO, R. C. B.; PINTO, G. P.; SOUZA, M. N. Agroecologia e a produção de cafés especiais. In: SOUZA, M. N.; SIMÃO, J. B. P. **Tópicos em cafeicultura Vol. IV – Cafés Especiais**. Canoas: RS. Mérida Publishers. 258 p. 2024. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-28-8>.

SILVERIO, M. B.; PAGANE, H, A.; JÚNIOR, A. J. Análise bibliográfica sobre os principais elementos que influenciam o processo de compostagem. **Agronomia de Precisão**: Inovações e Impacto no Campo, v. 1, n. 1, p. 1-25, 2025.

SOARES, A. A.; MATOS, A. T. de; LO MONACO, P. A. V.; SILVA, D. D. da; CECOM, P. R. Manejo e reutilização de águas residuárias na cafeicultura. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 54, n. 313, p. 472-479, 2007.

SOARES, A. A.; MATOS, A. T. de; LO MONACO, P. A. V.; SILVA, D. D. da; CECOM, P. R. Uso de água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro em sistemas agrícolas. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 16, n. 1, p. 41-49, 2008.

SOARES, S. F.; DONZELES, S. M. L.; MORELI, A. P.; ROCHA, A. C.; SOARES, G. F.; SOARES, V. F. **Água residuária do café: geração e aproveitamento**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2008. (Circular Técnica, 30).

SOARES, S. S.; SOARES, V. F.; SOARES, G. S.; ROCHA, A. C. da; MORELI, A. P.; PREZOTTI, L. C. **Destinação da água residuária do processamento dos frutos do cafeeiro**. Vitória: Incaper, 2007.

SOARES, S. F.; MORELI, A. P.; DONZELES, S. M. L.; PREZOTTI, L. C. **Reuso da água na produção de café cereja descascado**. Brasília: Embrapa Café, 2012. 8 p. (Circular Técnica, 1). Disponível em: Infoteca-e/Embrapa Café. Acesso em: 27 jun. 2025.

SOUZA, M. N. Agroecologia: fundamentos conceituais e princípios orientadores. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 21-32. ISBN: 978-65-84548-44-2. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c1>.

SOUZA, M. N. **Economia aplicada à valoração ambiental e sistemas de gestão ambiental: modelos aplicados à promoção do desenvolvimento sustentável**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Integrada. BH: IETEC, 2006. 248 p.

SOUZA, M. N. Prefácio. **Tópicos em agroecologia vol. V**. Canoas: Mérida Publishers, 2026. p. 4-7 Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

SOUZA, M. N. **Tópicos em agroecologia vol. V**. Canoas: Mérida Publishers. 2026. 346 p. Disponível em:

<http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1174889>. ISBN: 978-65-5331-162-6. DOI: 10.36524/978-65-5331-162-6.

SOUZA, M. N.; SIMÃO, J. B. P. **Tópicos em cafeicultura vol. IV – Cafés Especiais**. Canoas: RS. Mérida Publishers. 258 p. 2024. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-28-8>.

TSIGKOU, K.; DEMISSIE, B. A.; HASHIM, S.; GHOFrani-ISFAHANI, P.; THOMAS, R.; MAPINGA, K. F.; KASSAHUN, S. K.; ANGELIDAKI, I. Coffee processing waste: unlocking opportunities for sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 210, art. 115263, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>. Disponível em: ScienceDirect. Acesso em: 11 jun. 2025.

UNIÃO DOS EXPORTADORES DO BRASIL. **O recorde histórico das exportações de café do Brasil em 2024**. Rio de Janeiro: AEB, 2025. Disponível em: AEB. Acesso em: 15 jun. 2025.

ZAMPIERI, A. S.; SILVA, M. R.; OLIVEIRA, J. P.; SOUZA, F. A. Manejo de resíduos e subprodutos da cafeicultura: uma abordagem fundamentada na bioeconomia e economia circular. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, São Paulo, v. 15, p. 1-18, 2021.

ZAMPIERI, F. G.; ZAMPIERI, F. R. O.; BESTETI, P. I. de O.; SOUZA, M. A. A. da S.; BERMOND, K. Z.; NOVAES, C. A. de; PANCOTTO, T. A.; GOMES, A. L. C.; NOVAES, G. A. de; MUNIZ, F.; SOUZA, M. N. Café, solo e saber: a educação ambiental como instrumento de sustentabilidade na agroecologia. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 282-306. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c10>.

ZHAO, W.; CAO, X.; PAN, H.; LOU, Y.; WANG, H.; YANG, Q.; ZHUGE, Y. Effects of Biochar on Cadmium availability, nitrification and microbial communities in soils with varied pH levels. **Microorganisms**, v. 13, n. 17, p. 839, 2025.