

CAPÍTULO 3

Biocarvão em sistemas cafeeiros: efeitos nos atributos do solo e na sustentabilidade produtiva

Dâmaris de Souza Guimarães, Alex Justino Zacarias, Déborah Sampaio de Almeida, Magno do Carmo Parajara, Otacílio José Passos Rangel, Fernanda Barcelos de Paula, Willian Moreira da Costa, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6.c3>

Resumo

O solo desempenha papel fundamental na sustentabilidade da produção cafeeira, influenciando diretamente a disponibilidade de água e nutrientes, o desenvolvimento radicular e a produtividade das plantas. Em regiões tropicais, a predominância de solos altamente intemperizados, caracterizados por elevada acidez, baixa fertilidade natural e reduzida capacidade tampão, constitui um dos principais desafios para a cafeicultura. Nesse contexto, o biocarvão tem se destacado como uma alternativa promissora para a melhoria da qualidade do solo e para o fortalecimento da sustentabilidade dos sistemas produtivos. Este capítulo discute os principais mecanismos de atuação do biocarvão, abordando seus efeitos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com ênfase na elevação do pH, no aumento da capacidade de troca catiônica, na retenção de água e no estímulo à atividade microbiana. Também são discutidos aspectos relacionados à produção do biocarvão a partir de resíduos da própria cafeicultura, especialmente cascas, palhas e resíduos de poda, destacando seu potencial para promover a economia circular e agregar valor a subprodutos agrícolas. Além dos benefícios agronômicos, o biocarvão contribui para o sequestro de carbono e para a mitigação das mudanças climáticas, configurando-se como uma ferramenta estratégica para a agricultura de baixo carbono. Conclui-se que sua eficiência depende da qualidade da biomassa, das condições de pirólise e da adoção de práticas adequadas de manejo, sendo seu uso particularmente relevante para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Pirólise. Economia circular. Resíduos agroindustriais. Agricultura regenerativa. Capacidade de troca catiônica. Resiliência climática.

1. Introdução

O biocarvão tem despertado crescente interesse na comunidade científica e no setor produtivo, em função de seu elevado potencial para contribuir com a gestão sustentável de resíduos, a recuperação de áreas degradadas, a geração de energia renovável, o sequestro de carbono e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, destaca-se como condicionador de solos e agente remediador em ambientes contaminados, incluindo corpos hídricos (Lehmann; Joseph, 2015; Zacarias *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o reaproveitamento de resíduos orgânicos por meio da produção de biocarvão vem sendo resgatado e amplamente investigado como alternativa viável para a melhoria da qualidade do solo e do equilíbrio ambiental (Figura 1). Ressalta-se que o biocarvão apresenta composição química e estrutural altamente variável, influenciada tanto pela natureza da matéria-prima quanto pelas condições do processo de pirólise (IBI, 2015).

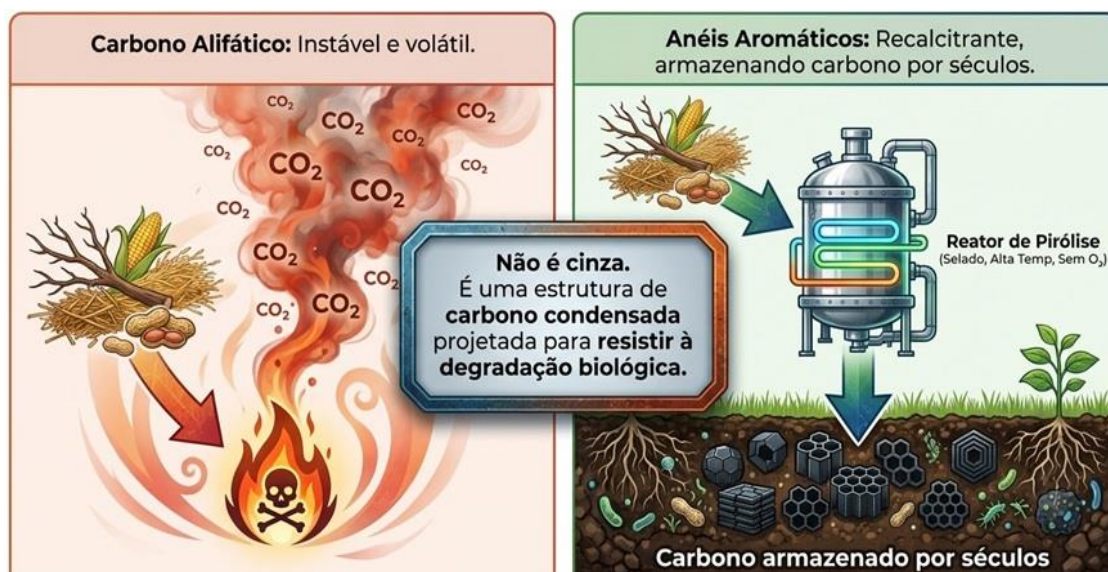


Figura 1. Fluxo de produção do biocarvão e seu papel no equilíbrio ambiental. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Em sistemas agrícolas, a aplicação de biocarvão tem sido associada a diversos efeitos benéficos sobre o solo, incluindo a elevação do pH, o aumento da capacidade de troca de cátions, a maior disponibilidade de nutrientes e alterações positivas na microbiota edáfica. Adicionalmente, contribui para a melhoria da estrutura do solo, promovendo maior agregação, redução da

densidade aparente e incremento na retenção de água (Lehmann, 2009). Além dos benefícios agronômicos, o biocarvão apresenta elevada estabilidade química, característica que lhe confere importante papel no sequestro de carbono e na mitigação das mudanças climáticas. Essa dupla função, agrícola e ambiental, tem ampliado o interesse de pesquisadores em diferentes áreas do conhecimento e em diversos países (Figura 2).

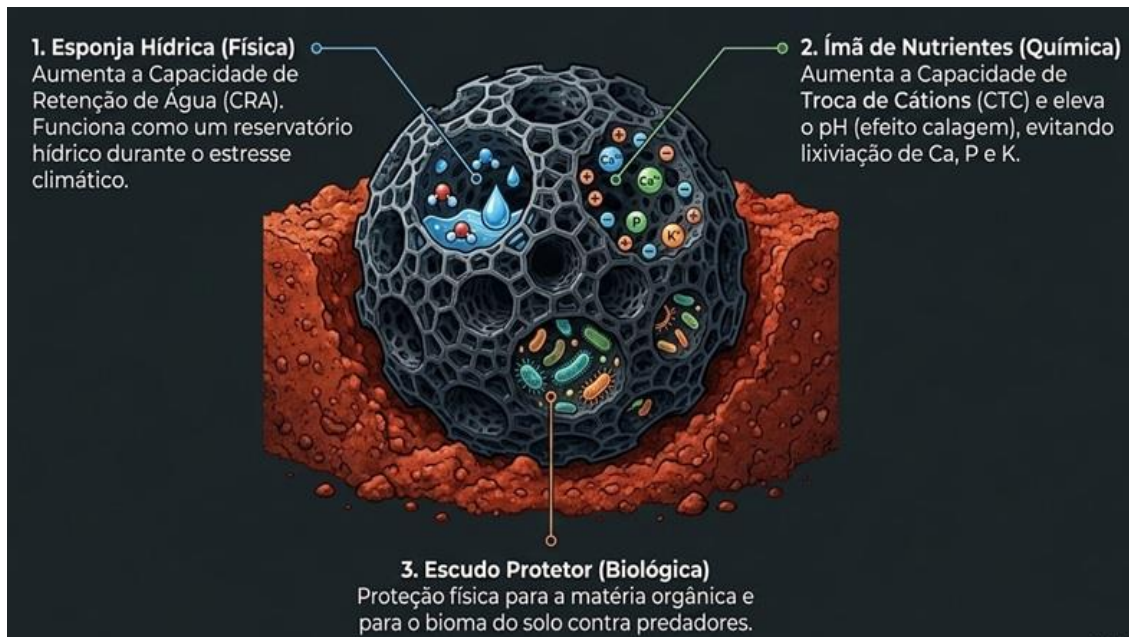


Figura 2. Interações do biocarvão e seus efeitos nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os mecanismos responsáveis por esses benefícios estão diretamente relacionados às características físico-químicas e biológicas do biocarvão, especialmente à sua elevada porosidade, área superficial específica e persistência no ambiente edáfico. No contexto da cafeicultura, o uso do biocarvão vem sendo explorado como uma estratégia promissora para o manejo sustentável do solo, com potencial para melhorar atributos físicos, químicos e biológicos essenciais ao desenvolvimento do cafeeiro. Sua aplicação pode favorecer o crescimento das plantas por meio da correção da acidez do solo, aumento do teor de matéria orgânica, maior disponibilidade de nutrientes e estímulo à atividade microbiana (Jien; Wang, 2013).

Tais benefícios são particularmente relevantes em regiões caracterizadas por solos ácidos e de baixa fertilidade natural, condições frequentemente observadas em áreas produtoras de café no Brasil. Dessa forma, o biocarvão se apresenta como uma alternativa inovadora para a promoção da sustentabilidade na cafeicultura, contribuindo simultaneamente para o aumento da produtividade, a melhoria da qualidade dos grãos e a redução dos impactos e externalidades ambientais associados à atividade (Moura *et al.*, 2022) (Figura 3).

	Eucalipto (Tese SP)	Casca de Café (Agritech)	Poda de Mangueira/Uva (Semiárido)	Mata Nativa (Semiárido)
Temperatura Base	~350°C	500-700°C	Não especificada	Não especificada
Solo Testado	Latossolo Argiloso	Diversos	Argissolo Amarelo	Argissolo Amarelo
Impacto Químico (pH e P)	Alto positivo	Alto positivo	Alto positivo	Baixo/Negativo

Alert: A qualidade do biocarvão depende estritamente de sua matéria-prima. Estudos em Petrolina (PE) provam que o biocarvão de mata nativa apresentou a pior performance química, desqualificando o desmatamento para sua produção.

Figura 3. Caracterização comparativa de biocarvões em função da natureza da biomassa residual. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A diversidade de matérias-primas disponíveis para a produção de biocarvão resulta em materiais com propriedades físico-químicas distintas, o que amplia suas possibilidades de aplicação em diferentes condições edafoclimáticas e sistemas produtivos. Compreender essas características torna-se fundamental para a utilização eficiente desse insumo na agricultura (Enders *et al.*, 2012; Mukherjee; Lal, 2013; Lehmann; Joseph, 2015).

Diante desse cenário, o presente capítulo tem como objetivo analisar os impactos do uso do biocarvão na qualidade do solo em sistemas cafeeiros, com ênfase em seus efeitos sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, bem como discutir seu potencial como estratégia sustentável para a melhoria da produtividade e a mitigação de impactos ambientais na cafeicultura. Para

compreender esses efeitos, torna-se necessário inicialmente discutir as características estruturais do biocarvão, os processos envolvidos em sua produção e suas principais aplicações no contexto agrícola.

Além dos benefícios agrônômicos e ambientais, a utilização do biocarvão na cafeicultura apresenta uma vantagem estratégica relacionada à disponibilidade de biomassa residual. Resíduos provenientes do processamento e manejo da cultura, como cascas, pergaminho, palha e materiais oriundos da poda, podem ser convertidos em biocarvão por meio da pirólise, promovendo o reaproveitamento de subprodutos e fortalecendo os princípios da economia circular nos sistemas produtivos cafeeiros (Woolf *et al.*, 2010; Mussatto *et al.*, 2011; Alvarenga *et al.*, 2023).

2. Características e aplicações do biocarvão na agricultura

O biocarvão é um material sólido rico em carbono, obtido pela conversão termoquímica de biomassa em condições de baixa ou ausência de oxigênio, denominada pirólise. O interesse científico por sua aplicação na agricultura foi intensificado a partir dos estudos sobre a Terra Preta de Índio (TPI), solos antropogênicos encontrados na Amazônia brasileira, caracterizados por coloração escura, elevada fertilidade e notável estabilidade da matéria orgânica. Esses solos apresentam altos teores de carbono pirogênico, fósforo, cálcio e outros nutrientes, além de elevada atividade biológica, características que despertaram o interesse de pesquisadores na reprodução artificial desses atributos por meio da aplicação de biocarvão em sistemas agrícolas (Falcão *et al.*, 2009).

Esses solos apresentam elevada capacidade de retenção de nutrientes e carbono, sendo frequentemente utilizados como referência para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de manejo e recuperação da fertilidade do solo. Embora diferentes hipóteses tenham sido propostas para explicar sua formação, destaca-se a influência de atividades antrópicas associadas ao acúmulo contínuo de resíduos orgânicos, restos alimentares, materiais cerâmicos e carvão pirogênico ao longo de centenas ou milhares de anos. Adicionalmente, processos naturais, como a deposição aluvial de

sedimentos ricos em carbono e nutrientes, podem ter contribuído para a constituição dessas áreas de elevada fertilidade (Silva *et al.*, 2021).

No contexto agrícola, a principal forma de utilização do biocarvão consiste em sua incorporação ao solo, visando melhorar atributos físicos, químicos e biológicos. Entretanto, suas possibilidades de uso extrapolam essa finalidade, podendo integrar formulações de fertilizantes, substratos agrícolas e materiais adsorventes. O biocarvão também tem sido empregado na remediação de ambientes contaminados, em razão de sua elevada capacidade de adsorção de compostos potencialmente tóxicos, além de contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para a implantação de estratégias de agricultura de baixo carbono (IBI, 2015). Essas múltiplas funções evidenciam seu potencial como insumo versátil e estratégico para a construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4. Distribuição de biocarvão em sulcos de plantio em sistema agrícola no Distrito de Rive, município de Alegre, ES. Fonte: Zacarias, 2019.

Diversos fatores podem influenciar positiva ou negativamente a viabilidade e a eficiência do uso do biocarvão na agricultura, abrangendo aspectos econômicos, logísticos, técnicos e ambientais. Entre os principais fatores

destacam-se a disponibilidade de biomassa, a distância entre as áreas produtoras e os reatores pirolíticos, a caracterização química da matéria-prima e a logística relacionada à produção, ao transporte e à aplicação do material.

Além disso, a definição adequada da dose, da época e da forma de aplicação, bem como as interações com corretivos, fertilizantes e defensivos agrícolas, podem influenciar significativamente os resultados obtidos no campo. Também devem ser considerados potenciais efeitos sobre a fauna edáfica, riscos ocupacionais durante o manuseio e o atendimento às exigências legais e ambientais vigentes (Andrade *et al.*, 2023).

Apesar dessas limitações, o crescente avanço das pesquisas tem demonstrado que a eficiência agrônômica do biocarvão está diretamente relacionada às suas propriedades físico-químicas, as quais são determinadas principalmente pela natureza da biomassa utilizada e pelas condições do processo de pirólise.

Nesse contexto, a Iniciativa Internacional de Biocarvão (IBI) publicou, em 2015, um conjunto de diretrizes para a amostragem, caracterização e análise das propriedades químicas, físicas e biológicas do biocarvão, contribuindo para a padronização metodológica, a comparação entre estudos e a segurança de sua utilização em sistemas agrícolas e ambientais (IBI, 2015).

No setor agropecuário, o potencial de sequestro de carbono no solo confere ao biocarvão um caráter estratégico, capaz de agregar valor à produção agrícola e favorecer o acesso a mercados associados à sustentabilidade e à agricultura de baixo carbono. A pirólise, processo de decomposição termoquímica da biomassa na ausência total ou parcial de oxigênio, é geralmente conduzida em temperaturas entre 300 e 700 °C, sendo considerada uma tecnologia eficiente para o aproveitamento de resíduos orgânicos. Esse processo promove a redução significativa do volume da biomassa, a eliminação de patógenos e a geração de produtos com potencial energético e químico de elevado valor agregam (Conesa *et al.*, 2009; Ahmad *et al.*, 2014; Tan *et al.*, 2014).

A eficiência da pirólise não está associada apenas à produção do biocarvão, mas também ao aproveitamento integral da biomassa residual. Dependendo das condições operacionais, o processo gera simultaneamente bio-

óleo, gases combustíveis e biocarvão, produtos que podem ser utilizados para fins energéticos, industriais e agrícolas. Dessa forma, a pirólise representa uma tecnologia alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos orgânicos e a redução da dependência de recursos não renováveis (Lehmann; Joseph, 2015). A dinâmica desse processo é apresentada na Figura 5.

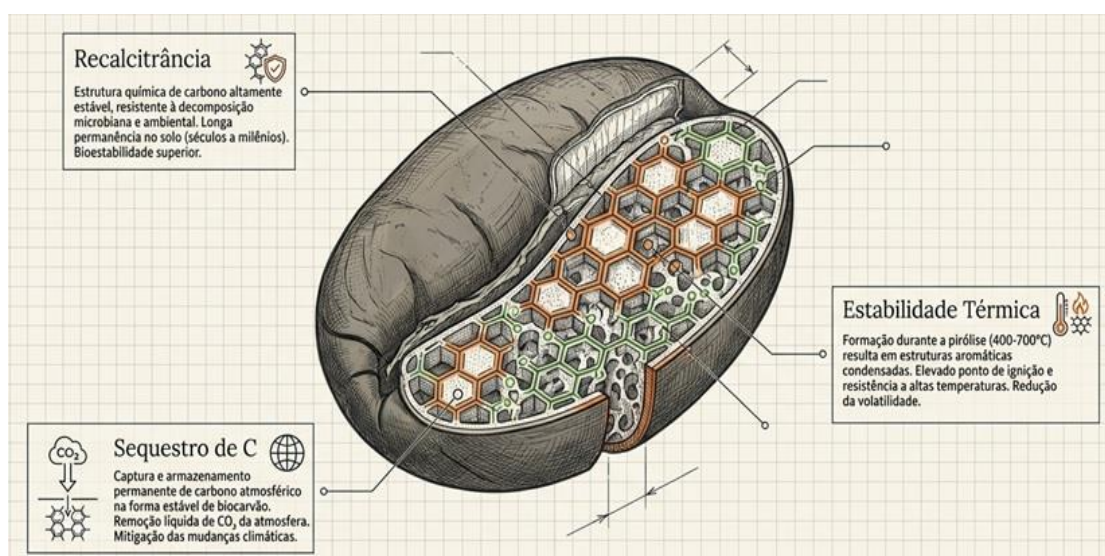


Figura 5. Representação esquemática do processo de pirólise e de suas contribuições para a bioeconomia circular, incluindo a produção de biocarvão, bio-óleo e gases combustíveis. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

As propriedades do biocarvão, como capacidade de troca de cátions (CTC), pH, área superficial específica e teor de carbono, estão diretamente relacionadas à natureza da biomassa utilizada, ao tamanho das partículas e às condições do processo de produção (Paz-Ferreiro *et al.*, 2014). No entanto, tais características podem sofrer modificações após sua incorporação ao solo em decorrência do processo de envelhecimento (*aging*), que compreende um conjunto de transformações físicas, químicas e biológicas resultantes da interação contínua do material com a matriz edáfica. Esse processo pode promover alterações na superfície do biocarvão, aumentar a formação de grupos funcionais oxigenados e modificar sua capacidade de retenção de nutrientes e água, influenciando diretamente sua eficiência agrônômica ao longo do tempo (Kookana, 2010).

Estudos experimentais evidenciam os efeitos positivos do biocarvão sobre atributos do solo. Major *et al.* (2010) observaram que o uso de biocarvão produzido a partir de resíduos de madeira promoveu elevação do pH, aumento dos teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e redução da acidez trocável. Resultados semelhantes foram reportados por Liang *et al.* (2006), que identificaram redução da densidade do solo, aumento do pH e maior capacidade de retenção de água (Figura 6). Adicionalmente, alterações na estrutura do solo, como aumento da microporosidade e redução da macroporosidade, foram descritas por Torres, Amorim e Faria (2024).

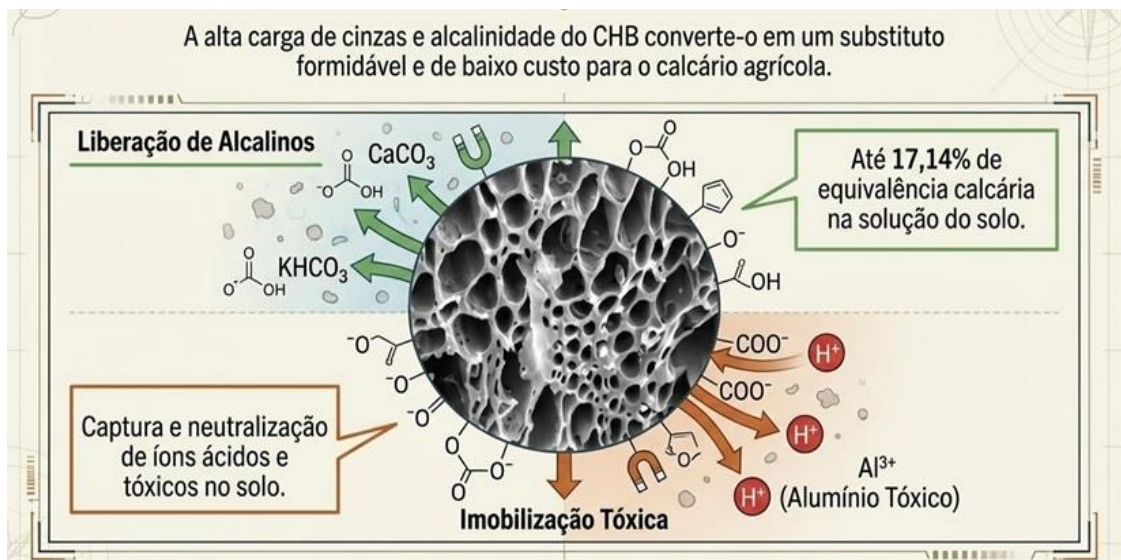


Figura 6. Representação dos processos de condicionamento químico e físico do solo por biocarvão. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

No que se refere à produtividade agrícola, Zhao *et al.* (2014) verificaram incremento na produção de arroz e trigo, associado à maior disponibilidade de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo. Lima *et al.* (2024) relataram que o biocarvão produzido a partir de cama de frango e fibra de coco reduziu a adsorção de fósforo, aumentando sua disponibilidade para as plantas.

De forma semelhante, Albuquerque *et al.* (2013) observaram que diferentes tipos de biocarvão atuaram como fonte de fósforo após período de incubação em casa de vegetação. Em estudos de longo prazo, Carneiro *et al.* (2020) também registraram aumento na disponibilidade de fósforo em solos

tropicais sob sistema integrado de rotação de culturas (capim, milho e feijão). Além de favorecer a fertilidade do solo, a aplicação de biocarvão contribui para a redução das emissões de CO₂, reforçando seu potencial na mitigação das mudanças climáticas (Woolf *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2011).

Durante a pirólise, parte do carbono presente na biomassa é convertida em formas altamente estáveis, capazes de permanecer armazenadas no solo por décadas ou séculos, reduzindo o retorno de CO₂ à atmosfera (Woolf *et al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2011; Lehmann; Joseph, 2015). Assim, o biocarvão constitui uma importante estratégia de sequestro de carbono e de aproveitamento de resíduos agrícolas, integrando práticas de manejo sustentável do solo, economia circular e agricultura de baixo carbono (*ibidem*) (Figura 7).



Figura 7. Aumento da disponibilidade de nutrientes e redução das emissões de CO₂ em sistemas agrícolas com biocarvão. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A dinâmica de estabilização do carbono promovida pelo biocarvão reforça sua importância não apenas como condicionador de solo, mas também como ferramenta estratégica para sistemas produtivos mais resilientes e ambientalmente sustentáveis. No contexto da cafeicultura, esses benefícios podem ser potencializados pela grande disponibilidade de biomassa residual gerada ao longo da cadeia produtiva, favorecendo o fechamento dos ciclos biogeoquímicos, a reciclagem de nutrientes e a redução da pegada de carbono da atividade. Nesse cenário, compreender a importância do solo para o

desenvolvimento do cafeeiro torna-se fundamental para avaliar o potencial do biocarvão como tecnologia voltada à melhoria da qualidade edáfica e da sustentabilidade produtiva.

3. Importância do solo para a produção cafeeira

A cafeicultura constitui uma atividade agrícola de elevada relevância econômica e social, especialmente em países tropicais como o Brasil. Nesse contexto, a produtividade e a qualidade do café estão diretamente condicionadas às características do solo, o qual deve apresentar atributos físicos, químicos e biológicos adequados ao pleno desenvolvimento do cafeeiro. Entre esses atributos, destacam-se a fertilidade, a estrutura do solo e a disponibilidade hídrica, elementos essenciais para o crescimento radicular, a absorção de nutrientes e o desempenho fisiológico das plantas (Malavolta *et al.*, 1997; Prado *et al.*, 2021).

Entretanto, a exploração contínua do solo em sistemas de manejo convencional pode desencadear processos de degradação, como a redução dos teores de matéria orgânica, a compactação, a acidificação e o desequilíbrio da microbiota edáfica. Tais alterações comprometem a capacidade produtiva do solo e reduzem sua sustentabilidade em longo prazo. Diante desse cenário, torna-se fundamental a adoção de práticas conservacionistas e o uso de insumos que promovam a saúde do solo, favorecendo a construção de sistemas produtivos mais resilientes (Silva; Mendonça, 2007; Macedo; Seabra; Silva, 2008; Souza, 2026).

A qualidade do solo pode ser compreendida como a capacidade desse recurso em sustentar a produtividade vegetal, manter a qualidade ambiental e promover a saúde dos organismos que nele habitam. Na cafeicultura, essa condição depende da interação equilibrada entre atributos físicos, químicos e biológicos, os quais influenciam diretamente processos como infiltração e armazenamento de água, ciclagem de nutrientes, desenvolvimento radicular e atividade microbiana (Figura 8). Solos com boa estrutura e elevados teores de matéria orgânica tendem a apresentar maior estabilidade física e química, favorecendo o crescimento das plantas e aumentando a resiliência dos sistemas

produtivos frente às oscilações climáticas (Vezzani; Mielniczuk, 2009; Brady; Weil, 2013; Souza, 2026).

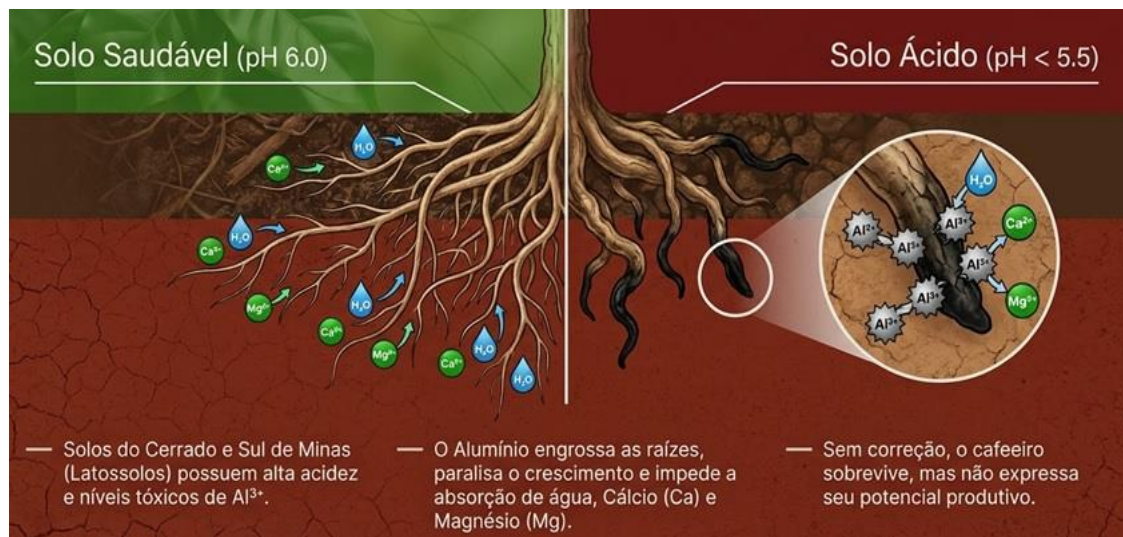


Figura 8. Fatores limitantes à produtividade: compactação, acidificação e perda de matéria orgânica. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os atributos do solo exercem influência direta sobre o desempenho agrônômico do cafeeiro ao longo de todo o ciclo produtivo. Alterações na estrutura física podem restringir o crescimento radicular, reduzir a infiltração e o armazenamento de água e comprometer a absorção de nutrientes. Da mesma forma, limitações químicas afetam a disponibilidade de elementos essenciais ao desenvolvimento vegetativo e à formação dos frutos. Paralelamente, a redução da atividade biológica compromete processos fundamentais relacionados à decomposição da matéria orgânica, à ciclagem de nutrientes e à manutenção da fertilidade do solo. Dessa forma, a degradação edáfica representa um dos principais fatores limitantes à produtividade, à sustentabilidade e à longevidade das lavouras cafeeiras (Vezzani; Mielniczuk, 2009; Brady; Weil, 2013; Souza, 2026).

Entre as limitações mais expressivas à produção cafeeira no Brasil, destaca-se a acidez do solo, particularmente em regiões de clima tropical úmido, onde a elevada pluviosidade intensifica a lixiviação de cátions básicos. Como consequência, observa-se baixa saturação por bases, presença de alumínio em níveis tóxicos e reduzida disponibilidade de fósforo, fatores que demandam

intervenções recorrentes, como a calagem e a adubação fosfatada, elevando os custos de produção (Raij, 2011).

A acidez do solo pode ser compreendida sob diferentes formas: a acidez ativa (H^+), relacionada à solução do solo; a acidez trocável (Al^{3+}), associada aos coloides; e a acidez potencial ($H+Al$), que expressa a capacidade tampão do sistema. Essa distinção é fundamental para o manejo adequado da fertilidade, uma vez que solos com elevada acidez potencial demandam maiores quantidades de corretivos para promover alterações significativas no pH. Solos com maior teor de argila e matéria orgânica tendem a apresentar maior capacidade tampão, o que implica maior resistência às mudanças de pH e, conseqüentemente, maior necessidade de insumos corretivos.

Para o cafeeiro, a faixa de pH considerada ideal situa-se entre 6,0 e 6,5, condição na qual ocorre a redução da toxicidade por alumínio e a maximização da disponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal. Adicionalmente, o equilíbrio entre cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no complexo de troca do solo exerce papel relevante no desempenho fisiológico das plantas, sendo recomendada uma relação Ca:Mg entre 3:1 e 4:1. Desequilíbrios nessa relação podem provocar inibição competitiva na absorção desses nutrientes, comprometendo processos fundamentais, como a formação de estruturas celulares e a atividade fotossintética (Matiello *et al.*, 2020; Guimarães *et al.*, 2022).

A manutenção de condições químicas favoráveis ao desenvolvimento do cafeeiro depende não apenas da correção da acidez, mas também da capacidade do solo em armazenar e disponibilizar nutrientes ao longo do tempo. Nesse contexto, atributos como capacidade de troca catiônica, saturação por bases e teor de matéria orgânica assumem papel fundamental na regulação da fertilidade. Alterações nesses parâmetros afetam diretamente a eficiência do uso de fertilizantes e o desempenho fisiológico das plantas, reforçando a importância de práticas de manejo que promovam a melhoria da qualidade química do solo, conforme ilustrado na Figura 9 (Raij, 2011; Malavolta *et al.*, 1997; Matiello *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2026).



Figura 9. Correção da acidez do solo e otimização da relação Ca:Mg como fatores determinantes da fertilidade em sistemas cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Outro desafio relevante refere-se à compactação do solo, que interfere negativamente no desenvolvimento do sistema radicular, na infiltração de água e na aeração, limitando a absorção de nutrientes pelas plantas. Esse problema é recorrente em áreas cafeeiras submetidas à mecanização intensiva ou ao tráfego frequente de máquinas e pessoas, demandando a adoção de práticas de manejo que promovam a descompactação e a melhoria da estrutura do solo (Reichert; Norton; Huang, 2007). Entretanto, a qualidade do solo não depende exclusivamente de seus atributos físicos e químicos. A funcionalidade dos processos biológicos também exerce papel determinante na manutenção da fertilidade e da estabilidade dos agroecossistemas cafeeiros.

Além dos atributos físicos e químicos, a manutenção de uma microbiota ativa e diversificada é essencial para a funcionalidade do solo. Os microrganismos desempenham papel central na ciclagem de nutrientes, na decomposição da matéria orgânica e na supressão de patógenos. A atividade microbiana está diretamente relacionada à disponibilidade de matéria orgânica e à estabilidade do ambiente edáfico, sendo considerado um importante indicador da qualidade do solo e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Silva; Mendonça, 2007; Lehmann *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2021) (Figura 10).

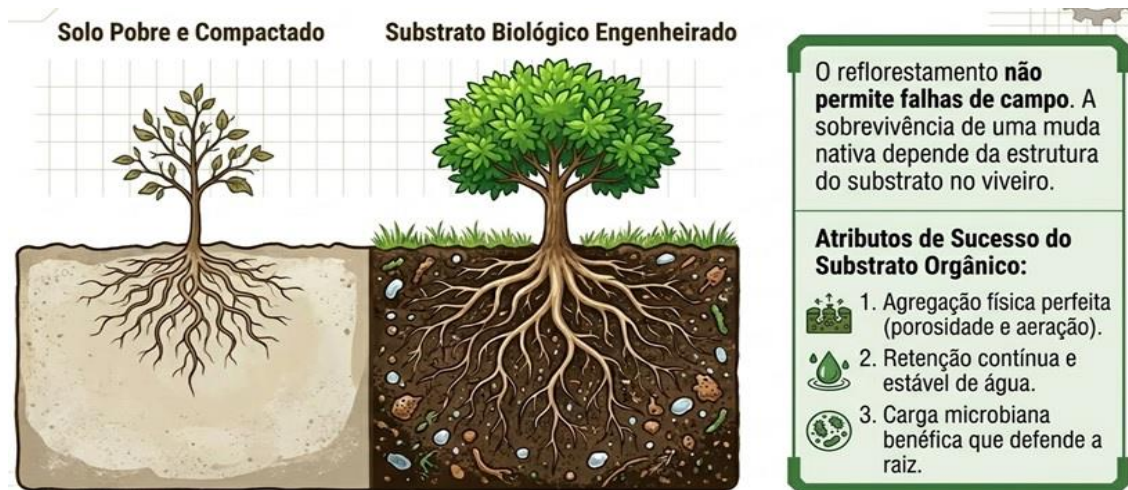


Figura 10. Representação da atividade microbiana e sua contribuição para a funcionalidade do solo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A manutenção da atividade microbiana e dos processos biológicos do solo está diretamente relacionada à disponibilidade de matéria orgânica e à adoção de práticas conservacionistas de manejo. Nesse contexto, estratégias integradas voltadas ao incremento da matéria orgânica têm se destacado como ferramentas fundamentais para a melhoria da qualidade do solo e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Souza *et al.*, 2026).

O processo de compostagem, por exemplo, pode ser potencializado pela adição de biocarvão (biochar) como condicionador do sistema (Melo, 2019). Sua incorporação ao composto orgânico promove melhorias nas propriedades físicas, como o aumento da porosidade, a redução da densidade aparente e a maior aeração, favorecendo a disponibilidade de oxigênio (O_2) para os microrganismos decompositores (Ferreira *et al.*, 2017).

Além dos efeitos sobre o processo de compostagem, o biocarvão pode atuar diretamente na melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Sua elevada área superficial específica e sua estrutura altamente porosa favorecem a retenção de água, a adsorção de nutrientes e a criação de microambientes propícios ao desenvolvimento de microrganismos benéficos. Essas características explicam o crescente interesse pelo uso do biocarvão como condicionador de solo em sistemas agrícolas sustentáveis, incluindo a

cafeicultura (Lehmann *et al.*, 2011; Lehmann; Joseph, 2015; Souza; Simão, 2024).

Adicionalmente, a estrutura altamente porosa do biocarvão proporciona sítios favoráveis à colonização microbiana, intensificando a atividade biológica e acelerando o processo de decomposição da matéria orgânica. Esse efeito contribui para a formação de compostos mais estáveis e com maior capacidade de retenção de nutrientes. No contexto da cafeicultura, a utilização conjunta de resíduos orgânicos e biocarvão, especialmente a partir da pirólise da palha de café, configura-se como uma estratégia eficiente de reciclagem de nutrientes e fortalecimento da fertilidade do solo, alinhada aos princípios da economia circular (Figura 11).

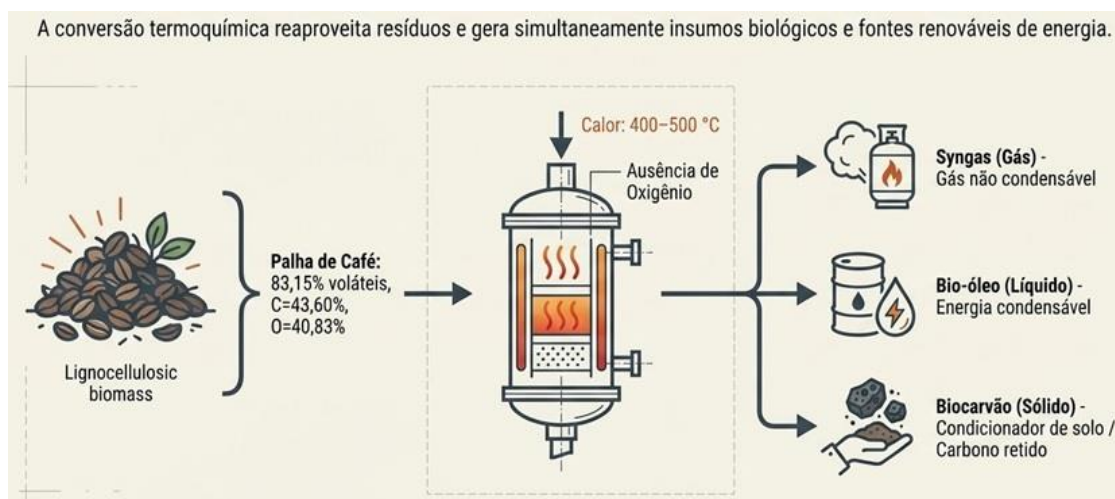


Figura 11. Esquema da economia circular na cafeicultura através da pirólise da palha de café. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Dessa forma, a melhoria das condições do solo na cafeicultura não deve se restringir ao uso de corretivos e fertilizantes minerais, mas incorporar abordagens integradas capazes de promover a resiliência, a eficiência no uso de recursos e o equilíbrio dos processos ecológicos do sistema produtivo. Nesse contexto, o biocarvão destaca-se como uma alternativa promissora por atuar simultaneamente sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para a produtividade das

lavouras cafeeiras (Lehmann; Joseph, 2015). Esses mecanismos e seus efeitos nos sistemas cafeeiros são discutidos em maior detalhe na seção seguinte.

4. Efeitos do biocarvão sobre os atributos do solo em sistemas cafeeiros

O biocarvão tem se consolidado como um insumo agrícola promissor, com potencial para melhorar a qualidade do solo e ampliar a sustentabilidade dos sistemas de produção, incluindo a cafeicultura (Figura 12). Sua aplicação em solos cultivados com cafeeiro visa mitigar limitações edáficas e promover condições mais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Glaser; Lehmann; Zech, 2002; Lehmann; Joseph, 2015).



Figura 12. Integração do biocarvão no sistema produtivo para a melhoria da qualidade do solo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Na prática, os benefícios associados ao biocarvão decorrem não apenas de suas características intrínsecas, mas também da forma como esse material é integrado ao manejo agrícola. Em sistemas cafeeiros, sua utilização pode ocorrer em diferentes etapas do ciclo produtivo, potencializando os processos de melhoria da qualidade do solo e da eficiência do uso de nutrientes. Na cafeicultura, o biocarvão pode ser utilizado em diferentes fases do sistema produtivo, desde a implantação do cafezal até o manejo de lavouras em produção. Sua aplicação pode ocorrer de forma incorporada ao solo, durante o

preparo das covas de plantio, ou em cobertura, frequentemente associada a compostos orgânicos, esterco ou adubos verdes (Figura 13). A definição da dose, da forma e do momento de aplicação depende de fatores como tipo de solo, condições climáticas e objetivos do manejo (Novotny *et al.*, 2015).



Figura 13. Formas de uso do biocarvão na cafeicultura, incluindo aplicação em covas de plantio, cobertura do solo e associação com insumos orgânicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (ChatGPT).

Estudos indicam que o uso do biocarvão pode contribuir para o aumento da produtividade do cafeeiro, sobretudo em função das melhorias promovidas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Entre os efeitos mais recorrentes, destacam-se a elevação do pH, o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) e a maior retenção de nutrientes, especialmente em solos ácidos e de baixa fertilidade, comuns em regiões cafeeiras tropicais (Lehmann *et al.*, 2011; Paz-Ferreiro *et al.*, 2014). Essas modificações influenciam diretamente a disponibilidade de recursos para as plantas e justificam a análise detalhada dos impactos do biocarvão sobre os diferentes componentes da qualidade do solo.

O potencial corretivo do biocarvão pode ser estimado por meio do equivalente de carbonato de cálcio (CaCO_3 eq), que expressa sua capacidade relativa de neutralização da acidez. Embora, em geral, seja inferior à do calcário convencional, essa capacidade tende a apresentar maior persistência no solo, devido à atuação contínua dos grupos funcionais superficiais do biocarvão. Em solos tropicais altamente intemperizados, a baixa capacidade tampão intensifica a vulnerabilidade a variações de pH, de modo que o biocarvão também contribui para maior estabilidade química do sistema (Figura 14).

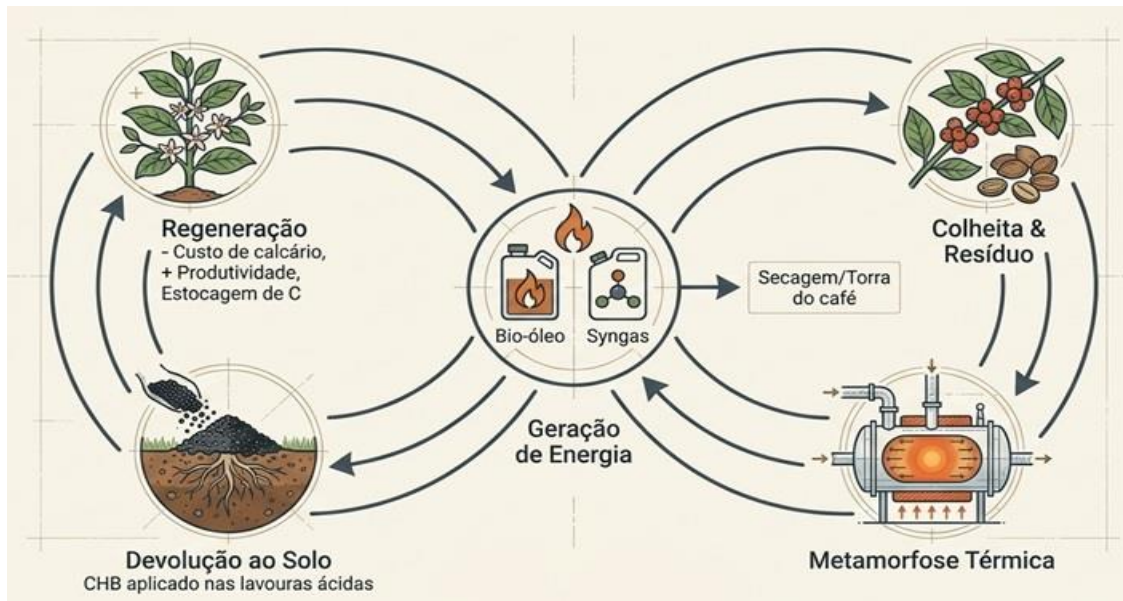


Figura 14. Representação da economia circular e ciclagem de nutrientes via biocarvão na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além de favorecer a reciclagem de nutrientes e a estabilidade química do sistema produtivo, o biocarvão exerce efeitos significativos sobre os atributos físicos do solo, ampliando sua capacidade de armazenamento de água e melhorando as condições para o crescimento radicular. Adicionalmente, o biocarvão atua como condicionador da estrutura do solo, promovendo maior aeração, redução da densidade aparente e incremento na capacidade de retenção de água. Esses atributos são particularmente importantes para o desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro, que é sensível à compactação e à limitação hídrica, sobretudo em regiões sujeitas a períodos de veranico (Mukherjee; Lal, 2013; Zacarias *et al.*, 2022).

A interação do biocarvão com a matéria orgânica e a microbiota do solo também apresenta resultados promissores. A elevada porosidade e a grande área superficial do biocarvão favorecem a colonização por microrganismos, estimulando a atividade biológica, a ciclagem de nutrientes e a eficiência no uso de fertilizantes, o que contribui para a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Lehmann *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2016; Zacarias *et al.*, 2022).

Embora os efeitos do biocarvão sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo sejam predominantemente positivos, alguns aspectos

relacionados ao manejo devem ser considerados para maximizar seus benefícios agrônômicos. Entre eles, destaca-se a possibilidade de ocorrência de imobilização temporária de nitrogênio em materiais com elevada relação C/N, fenômeno associado à intensificação da atividade microbiana após a aplicação (Figura 15).



Figura 15. Representação esquemática dos mecanismos de imobilização temporária de nitrogênio no solo após a aplicação de biocarvão com elevada relação C/N. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A imobilização temporária de nitrogênio associada à aplicação de biocarvão com elevada relação C/N é um fenômeno amplamente reconhecido na literatura científica, resultante da interação entre fatores químicos, físicos e biológicos do solo. Biocarvões com alta relação carbono/nitrogênio disponibilizam grandes quantidades de carbono, estimulando a atividade microbiana. Nesse processo, os microrganismos utilizam o carbono como fonte de energia e passam a demandar nitrogênio mineral do solo para a síntese de sua biomassa, reduzindo temporariamente a disponibilidade desse nutriente para as plantas (Lehmann; Joseph, 2015). Esse efeito tende a ser mais pronunciado em biocarvões produzidos a temperaturas mais baixas, os quais apresentam maior fração de carbono lábil e, conseqüentemente, maior estímulo à atividade microbiana (Spokas *et al.*, 2012).

Esse processo não depende exclusivamente das características do biocarvão, sendo também fortemente influenciado pelas condições ambientais e pelas propriedades do solo. As condições edafoclimáticas exercem papel determinante na intensidade e na duração da imobilização de nitrogênio. Solos com maior disponibilidade hídrica e temperaturas mais elevadas favorecem a atividade biológica, intensificando a assimilação microbiana do nitrogênio mineral. Além disso, a textura do solo também influencia esse fenômeno, uma vez que solos arenosos, por apresentarem menor capacidade de retenção de água e nutrientes, podem intensificar a limitação temporária de nitrogênio disponível às plantas (Novak *et al.*, 2010).

O teor inicial de nitrogênio no solo constitui outro fator determinante, pois em ambientes naturalmente pobres nesse nutriente a competição entre microrganismos e plantas torna-se mais acentuada (Bruun *et al.*, 2012). Soma-se a isso a dose de biocarvão aplicada, sendo que maiores quantidades ampliam a oferta de carbono e, conseqüentemente, o potencial de imobilização microbiana (Steiner *et al.*, 2007).

Apesar desse efeito inicial, práticas de manejo adequadas podem mitigar significativamente a limitação nutricional. A suplementação com fertilizantes nitrogenados, especialmente de forma parcelada, reduz a competição entre plantas e microrganismos e aumenta a eficiência de uso do nutriente (Lehmann; Joseph, 2015).

O pré-condicionamento do biocarvão, por meio de sua compostagem ou mistura com fontes orgânicas, promove o enriquecimento nutricional do material antes da aplicação, diminuindo a intensidade da imobilização inicial (Glaser; Lehmann; Zech, 2002). Adicionalmente, a escolha de biocarvões com menor relação C/N ou maior estabilidade do carbono, bem como sua integração com fontes orgânicas ricas em nitrogênio, contribui para o equilíbrio da dinâmica nutricional do sistema (Novak *et al.*, 2010; Spokas *et al.*, 2012).

Os benefícios decorrentes do manejo adequado do biocarvão refletem-se em melhorias expressivas dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com impactos positivos sobre a produtividade das culturas, conforme ilustrado na Figura 16.

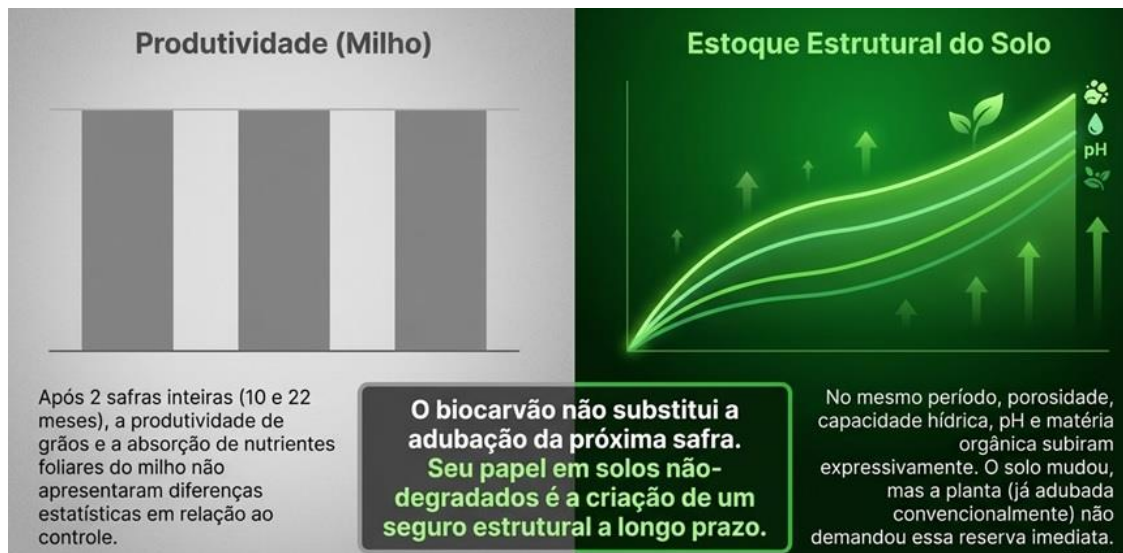


Figura 16. Comparativo entre indicadores de qualidade do solo (C-orgânico e estrutura) e produtividade da cultura sob aplicação de biocarvão. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além da escolha do tipo de biocarvão e das estratégias de suplementação nutricional, o momento de aplicação também deve ser considerado, sendo recomendável incorporar o biocarvão com antecedência ao plantio, permitindo que o sistema atinja um novo equilíbrio biológico antes das fases de maior demanda nutricional das culturas (Bruun *et al.*, 2012; Souza; Rangel; Passos, 2023). Assim, embora a imobilização de nitrogênio represente um desafio inicial, trata-se de um processo transitório: quando adequadamente manejado, pode contribuir para a melhoria da fertilidade do solo, da eficiência no uso de nutrientes e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas em longo prazo (Alvarenga *et al.*, 2023; Souza; Rangel; Passos, 2023).

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial da própria cafeicultura como fonte de matéria-prima para a produção de biocarvão, especialmente por meio do aproveitamento da palha de café. Nesse sentido, Alvarenga *et al.* (2023) destacam que a conversão desse resíduo em biocarvão, por meio da pirólise, constitui uma alternativa adequada para seu manejo.

Para esses mesmos autores, a temperatura de pirólise exerce papel determinante nas propriedades do biocarvão, sendo que materiais produzidos entre 400 °C e 600 °C tendem a apresentar maior estabilidade estrutural e

predominância de compostos aromáticos, enquanto temperaturas mais baixas podem resultar na presença de compostos orgânicos voláteis potencialmente indesejáveis. Além de contribuir para a melhoria da qualidade do solo, essa prática pode reduzir problemas fitossanitários, como a proliferação da mosca-dos-estábulo (*Stomoxys calcitrans*), frequentemente associada ao acúmulo inadequado de resíduos orgânicos (Figura 17).

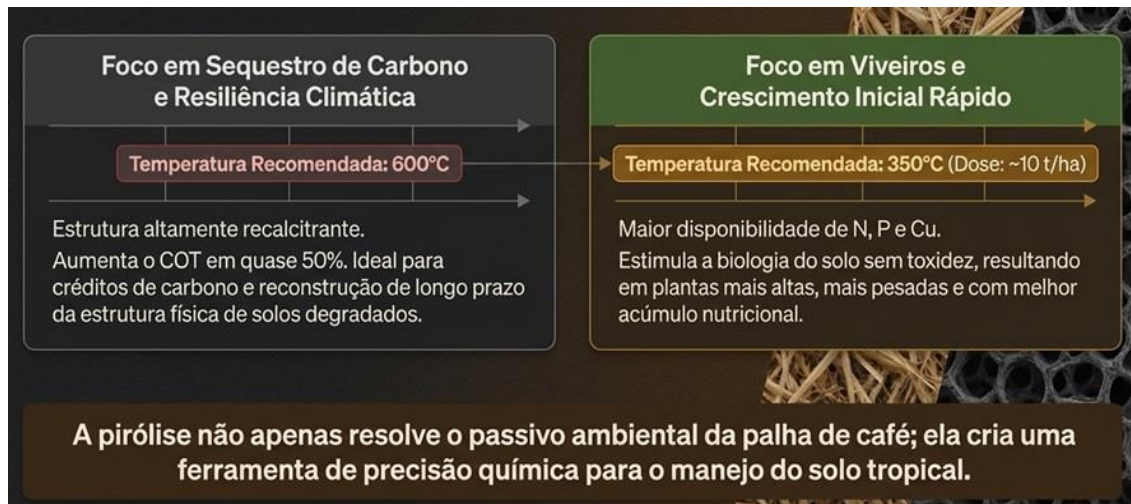


Figura 17. Efeitos da temperatura de pirólise na qualidade do biocarvão produzido a partir da palha de café e suas implicações agronômicas e ambientais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além dos benefícios relacionados ao manejo sustentável dos resíduos da cafeicultura e à redução de problemas fitossanitários, a qualidade do biocarvão obtido influencia diretamente sua eficiência agrônômica após a aplicação ao solo. Compreender os mecanismos físico-químicos responsáveis por sua atuação é fundamental para explicar seus efeitos sobre a fertilidade do solo e o desenvolvimento das plantas.

Em solos tropicais altamente intemperizados, o biocarvão contribui para a correção da acidez e para o aumento da fertilidade ao elevar o pH por meio da presença de carbonatos, bicarbonatos e cinzas ricas em bases, além de reduzir a toxicidade do alumínio pela complexação com grupos funcionais, como carboxilas ($-\text{COOH}$) e hidroxilas ($-\text{OH}$) (Lehmann; Joseph, 2015). Sua elevada área superficial e a predominância de cargas negativas aumentam a capacidade de troca de cátions (CTC), favorecendo a retenção de potássio (K), cálcio (Ca) e

magnésio (Mg) e reduzindo perdas por lixiviação. Além disso, sua estrutura porosa amplia a retenção de água no solo, contribuindo para maior resiliência das plantas em períodos de déficit hídrico (Paz-Ferreiro *et al.*, 2014; Mukherjee; Lal, 2013; Souza; Rangel; Passos, 2023). A Figura 18 sintetiza os principais mecanismos de produção e atuação do biocarvão, desde o processo de pirólise até seus efeitos físicos, químicos e ambientais nos sistemas agrícolas.



Figura 18. Representação do processo de pirólise em diferentes temperaturas e os benefícios sistêmicos do biocarvão na agricultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Conforme ilustrado na Figura 18, além dos benefícios relacionados à melhoria dos atributos físicos e químicos do solo, o processo de pirólise confere ao biocarvão elevada estabilidade estrutural. A formação de estruturas aromáticas durante sua produção aumenta a recalcitrância do material, permitindo que parte do carbono permaneça armazenada no solo por longos períodos e contribuindo para o sequestro de carbono (Woolf *et al.*, 2010; Bekchanova *et al.*, 2024; Enebe *et al.*, 2025).

Além disso, evidências indicam que sua aplicação pode reduzir emissões de gases de efeito estufa, especialmente óxido nitroso (N_2O), e favorecer a conservação do carbono orgânico do solo, reforçando seu papel na mitigação das mudanças climáticas (Woolf *et al.*, 2010; Marin *et al.*, 2025; Adekiya *et al.*, 2026).

Dessa forma, o uso do biocarvão em sistemas cafeeiros configura-se como uma estratégia tecnicamente viável para a conservação do solo, a mitigação de

impactos ambientais e o aumento da eficiência produtiva. Sua adoção, especialmente quando integrada a práticas agroecológicas e ao manejo racional de insumos, reforça o potencial da cafeicultura como atividade alinhada aos princípios da sustentabilidade.

Entretanto, a magnitude desses benefícios não é uniforme, variando em função da qualidade do biocarvão, da matéria-prima utilizada, das condições de pirólise, da dose aplicada, das características edafoclimáticas e das estratégias de manejo adotadas. Assim, para que esse insumo seja utilizado de forma eficiente e segura, torna-se fundamental discutir as diretrizes técnicas que orientam sua produção, aplicação e monitoramento em sistemas cafeeiros, bem como as implicações práticas associadas ao seu uso (Woolf *et al.*, 2010; IBI, 2015; Bekchanova *et al.*, 2024; Shyam *et al.*, 2025; Adekiya *et al.*, 2026).

5. Diretrizes técnicas e implicações práticas do uso do biocarvão em sistemas cafeeiros

A utilização do biocarvão na agricultura tropical, especialmente em sistemas cafeeiros, requer a adoção de diretrizes técnicas que contemplem tanto os processos de produção quanto as estratégias de aplicação e monitoramento no solo. O biocarvão é um material sólido resultante da decomposição termoquímica da biomassa em condições de baixa disponibilidade de oxigênio, processo denominado pirólise, sendo caracterizado por elevada estabilidade e resistência à decomposição (Teixeira *et al.*, 2015).

A qualidade do biocarvão depende da matéria-prima utilizada e das condições de pirólise, especialmente da temperatura. Resíduos lignocelulósicos, como palha e casca de café, apresentam elevado potencial para produzir biocarvão com características agrônômicas favoráveis, sobretudo quando submetidos a temperaturas entre 400 °C e 700 °C, faixa que favorece a formação de estruturas aromáticas estáveis e aumenta a recalcitrância do material no solo (Andrade *et al.*, 2020; Manguti *et al.*, 2020).

A temperatura de pirólise influencia diretamente a composição química e a estrutura física do biocarvão. Temperaturas inferiores a 400 °C preservam maior proporção de compostos lábeis, enquanto temperaturas mais elevadas

favorecem a condensação de estruturas aromáticas, aumentando a estabilidade do carbono no solo. Esse processo também modifica propriedades como área superficial, porosidade e capacidade de adsorção de nutrientes, determinantes para sua eficiência agrônômica e ambiental (Lehmann; Joseph, 2015; Bekchanova *et al.*, 2024). A Figura 19 ilustra a influência da temperatura de pirólise sobre o fracionamento do carbono (C) e seus efeitos no incremento do carbono orgânico total (COT) do solo.

A definição da dose de aplicação deve considerar a textura e as propriedades do solo. Em Latossolos argilosos, comuns em regiões cafeeiras, estudos indicam respostas consistentes a doses entre 10 e 50 Mg ha⁻¹, com melhorias graduais na fertilidade e nos atributos físicos do solo ao longo do tempo. Ressalta-se que esses efeitos tendem a se manifestar de forma progressiva, sendo mais expressivos em médio e longo prazo, o que exige alinhamento das expectativas quanto aos resultados produtivos imediatos (Andrade *et al.*, 2020). Em solos arenosos ou de média textura, caracterizados por menor capacidade de retenção hídrica, doses mais elevadas podem ser necessárias para maximizar os efeitos sobre a disponibilidade de água e nutrientes (Freitas *et al.*, 2016).



Figura 19. Esquema do fracionamento do carbono (frações lábeis vs. não lábeis) e impacto da temperatura de 600 °C no incremento do Carbono Orgânico Total (COT). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A estratégia de aplicação também influencia os resultados agronômicos. Aplicações únicas em doses elevadas tendem a promover incrementos mais rápidos nos estoques de carbono e na melhoria estrutural do solo, porém demandam maior volume de material e investimentos iniciais mais elevados. Em contrapartida, aplicações parceladas ao longo do tempo podem facilitar a logística operacional e a adequação do manejo às condições da propriedade, embora apresentem menor eficiência inicial e possam resultar em custos acumulados superiores ao longo do período de aplicação (Lorenz; Lal, 2014; Andrade *et al.*, 2020; Souza; Rangel; Passos, 2023).

Em sistemas cafeeiros, recomenda-se a incorporação do biocarvão na camada de 0,00-0,20 m, região de maior atividade radicular e interação com fertilizantes. Cabe destacar que o biocarvão não deve ser considerado um fertilizante direto, mas sim um condicionador de solo, cuja principal função é aumentar a eficiência do uso de nutrientes e promover melhorias estruturais, físicas e químicas ao longo do tempo.

Embora os benefícios do biocarvão sejam amplamente reconhecidos na literatura, sua aplicação prática ainda é cercada por interpretações equivocadas e expectativas muitas vezes incompatíveis com sua real função agrônômica. Frequentemente, o biocarvão é confundido com um fertilizante convencional de efeito imediato, quando, na realidade, atua predominantemente como condicionador do solo, promovendo melhorias graduais nos atributos físicos, químicos e biológicos do sistema. Nesse sentido, compreender sua forma de aplicação, seus mecanismos de ação na zona radicular e as limitações associadas ao seu uso, são fundamentais para maximizar seus benefícios. A Figura 20 apresenta uma síntese dos principais conceitos, evidências científicas e equívocos frequentemente associadas à utilização do biocarvão em sistemas agrícolas.

Além dos aspectos relacionados ao manejo e à aplicação do biocarvão no solo, outro fator estratégico refere-se à origem da biomassa utilizada em sua produção. A integração do biocarvão em estratégias de economia circular constitui um diferencial relevante. Subprodutos da cafeicultura, tais como casca, palha e resíduos de poda, podem ser convertidos em biocarvão, reduzindo o passivo ambiental e promovendo a geração de insumos dentro da própria

unidade produtiva. Além disso, a pirólise desses resíduos favorece a retenção de nutrientes, como o potássio, na matriz do biocarvão, reduzindo perdas por lixiviação e aumentando sua eficiência agrônômica (Andrade *et al.*, 2020).

O que o mercado diz (Mito)	O que a ciência prova (Evidência)
 Substitui o fertilizante mineral instantaneamente.	 Trabalha em sinergia com o fertilizante mineral NPK, retendo os íons nos seus poros e impedindo a lixiviação.
 Aumenta exponencialmente a safra no 1º ano.	 Em solos tropicais já produtivos, a planta estabiliza; o ganho de curto prazo é na saúde física do solo (densidade e retenção de água).
 Todo biocarvão atua da mesma forma.	 Biomassa dita eficácia. Matérias-primas de mata nativa (desmatamento) apresentam qualidade química inferior a resíduos agrícolas.

Figura 20. Esquema de aplicação do biocarvão na zona radicular: mitos e evidências. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Antes da aplicação em larga escala, recomenda-se a realização de testes de qualidade, como ensaios de germinação, visando identificar possíveis efeitos fitotóxicos decorrentes de processos de pirólise inadequados. Esse procedimento é essencial para garantir a segurança do uso do biocarvão e evitar prejuízos ao desenvolvimento inicial das plantas (Teixeira *et al.*, 2015).

Além dos aspectos relacionados ao monitoramento dos efeitos do biocarvão no solo, é fundamental considerar a qualidade e a segurança da matéria-prima utilizada em sua produção, uma vez que resíduos agrícolas manejados inadequadamente podem representar riscos agrônômicos e fitossanitários. No estado do Espírito Santo, a utilização direta da casca de café in natura na lavoura tem sido restringida por órgãos ambientais e de defesa agropecuária devido aos riscos associados a esse resíduo.

A casca de café pode atuar como importante fonte de inóculo para pragas e patógenos, destacando-se a broca-do-café, cuja disseminação pode ser favorecida pelo manejo inadequado dos resíduos da pós-colheita. Além disso, sua decomposição no solo pode provocar fermentações indesejáveis, liberação de compostos potencialmente tóxicos e desequilíbrios nutricionais,

especialmente relacionados à imobilização de nitrogênio, comprometendo o desenvolvimento inicial das plantas (Matiello *et al.*, 2010; Guimarães *et al.*, 2016; Alvarenga *et al.*, 2023; Enebe *et al.*, 2025).

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial poluidor desse resíduo quando manejado de forma inadequada. A casca de café apresenta elevada carga orgânica e pode gerar lixiviados ricos em compostos fenólicos e potássio, os quais, ao atingirem corpos d'água, contribuem para processos de eutrofização e degradação ambiental. Por essa razão, normas técnicas e recomendações agrônômicas têm desencorajado sua aplicação direta no campo, priorizando formas de tratamento capazes de reduzir esses impactos. Nesse contexto, a restrição não representa uma limitação ao aproveitamento do resíduo, mas sim uma orientação para seu uso mais seguro, eficiente e ambientalmente adequado.

Diante dos potenciais riscos associados ao uso inadequado de resíduos orgânicos na cafeicultura, torna-se fundamental adotar critérios técnicos que orientem sua transformação e aplicação no sistema produtivo. Nesse contexto, a conversão da biomassa residual em biocarvão representa uma alternativa capaz de reduzir riscos fitossanitários, minimizar impactos ambientais e aumentar a estabilidade do carbono incorporado ao solo. Entretanto, a eficiência dessa estratégia depende da avaliação prévia da matéria-prima, das condições de processamento e das características do ambiente de aplicação. A adoção de protocolos técnicos e de boas práticas de manejo constitui etapa essencial para garantir que os benefícios agrônômicos e ambientais do biocarvão sejam plenamente alcançados (Lehmann; Joseph, 2015; IBI, 2015; Bekchanova *et al.*, 2024). A Figura 21 apresenta um fluxograma com as principais diretrizes técnicas e etapas de decisão para sua utilização segura em sistemas cafeeiros.

O monitoramento dos efeitos do biocarvão no solo deve ser realizado por meio de análises químicas e físicas em diferentes profundidades, permitindo avaliar a evolução dos atributos do solo ao longo do tempo. Técnicas complementares, como a análise isotópica do carbono, podem ser empregadas para diferenciar o carbono pirogênico do carbono orgânico nativo, contribuindo para a avaliação do sequestro de carbono (Andrade *et al.*, 2020).

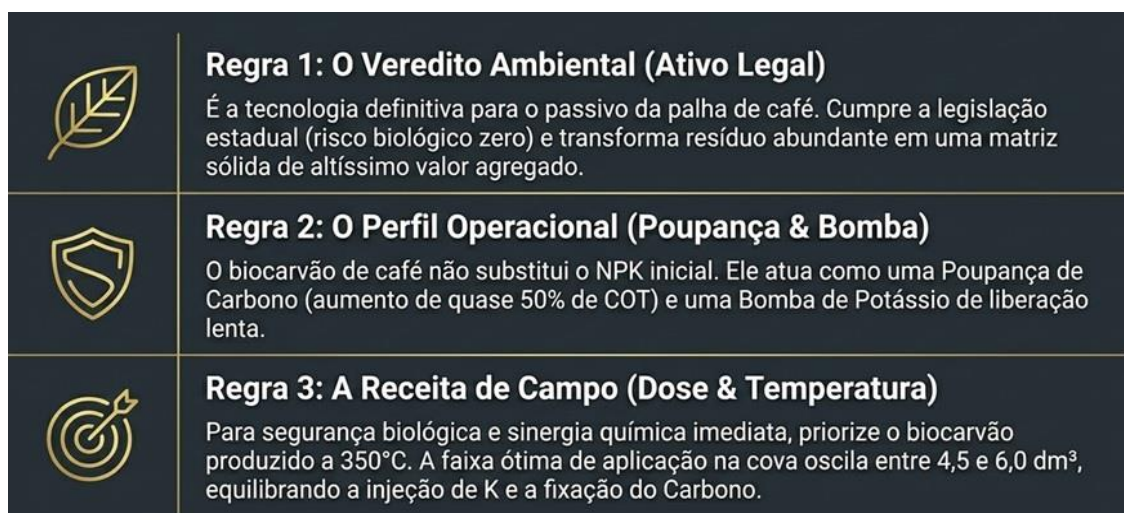


Figura 21. Fluxograma de segurança e diretrizes estratégicas para aplicação de biocarvão na cafeicultura. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Embora a casca de café represente uma matéria-prima promissora para a produção de biocarvão, seu uso direto na lavoura demanda cuidados específicos. Quando manejado inadequadamente, esse resíduo pode favorecer a disseminação de pragas e patógenos, além de contribuir para impactos ambientais associados à elevada carga orgânica e à geração de lixiviados. Dessa forma, torna-se importante compreender os principais riscos agrônômicos, fitossanitários e ambientais relacionados à utilização da casca de café *in natura*, bem como as limitações legais associadas ao seu manejo, conforme ilustrado na Figura 22.



Figura 22. Esquema dos riscos da casca de café *in natura* e o gargalo legal no Espírito Santo. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Diante desse cenário, o biocarvão surge como uma alternativa promissora para o aproveitamento da casca de café, convertendo um resíduo potencialmente problemático em um insumo de alto valor agronômico. Por meio do processo de pirólise, a casca é transformada em um material estável, com elevada capacidade de retenção de água e nutrientes, além de menor risco de contaminação biológica. O uso do biocarvão contribui para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além de reduzir a emissão de gases de efeito estufa e promover a ciclagem de nutrientes em sistemas agrícolas sustentáveis (Novak *et al.*, 2010; Lehmann; Joseph, 2015). Assim, a conversão da casca de café em biocarvão representa uma estratégia alinhada aos princípios da agroecologia e da economia circular, especialmente relevante para a cafeicultura capixaba.

Dessa forma, a adoção de diretrizes técnicas para a produção e aplicação do biocarvão é fundamental para maximizar seus benefícios agronômicos e ambientais. Quando adequadamente manejado, o biocarvão constitui uma ferramenta estratégica não apenas para a melhoria da qualidade do solo, mas também para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, eficientes no uso de recursos e alinhados às demandas da agricultura de baixo carbono (Figura 23).



Figura 23. Infográfico de síntese estratégica: pilares para a construção de sistemas cafeeiros resilientes e de baixo carbono. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A síntese apresentada na Figura 23 evidencia que os benefícios do biocarvão transcendem a simples melhoria de atributos isolados do solo, abrangendo dimensões produtivas, ambientais e climáticas. Quando associado a práticas adequadas de manejo e ao aproveitamento sustentável de resíduos da própria atividade cafeeira, esse insumo contribui para o fortalecimento da resiliência dos agroecossistemas e para a consolidação de modelos produtivos mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, os resultados discutidos ao longo deste capítulo fornecem subsídios importantes para a compreensão do potencial do biocarvão na cafeicultura, servindo de base para as reflexões apresentadas nas considerações.

6. Considerações

A viabilização do uso do biocarvão na agricultura está diretamente relacionada à qualidade da biomassa utilizada, às condições do processo de pirólise e à logística de produção, transporte e aplicação no campo. A padronização desses fatores é essencial para garantir a eficiência agrônômica, a segurança ambiental e a previsibilidade dos resultados obtidos. Além disso, a presença potencial de contaminantes, como metais pesados e compostos orgânicos indesejáveis, reforça a necessidade de protocolos rigorosos de caracterização e controle de qualidade. Nesse contexto, a elevada estabilidade do carbono presente no biocarvão constitui um importante mecanismo de sequestro de carbono no solo, conferindo relevância estratégica a esse material no enfrentamento das mudanças climáticas e na transição para sistemas agrícolas de baixo carbono.

O uso do biocarvão na formulação de fertilizantes organominerais e substratos agrícolas representa uma alternativa promissora para aumentar a eficiência no uso de nutrientes. Sua elevada capacidade de adsorção, associada à liberação gradual dos elementos minerais, contribui para a redução de perdas por lixiviação e volatilização, favorecendo maior aproveitamento dos nutrientes pelas plantas. Entretanto, a resposta agrônômica depende das características do biocarvão, especialmente de sua relação C/N, que pode influenciar a dinâmica do nitrogênio no solo e exigir ajustes no manejo da adubação, sobretudo nas fases iniciais após a aplicação.

Na cafeicultura, esses efeitos assumem maior relevância devido à predominância de solos ácidos, frequentemente caracterizados por baixa fertilidade natural e limitada capacidade tampão. Nesses ambientes, o biocarvão atua não apenas na elevação do pH, mas também na estabilização química do solo, contribuindo para a redução da toxicidade por alumínio, para o aumento da eficiência do uso de nutrientes e para a ampliação da capacidade de retenção de água. Esse último aspecto é particularmente importante em regiões sujeitas a períodos de déficit hídrico e veranicos, uma vez que favorece maior resiliência das plantas frente às oscilações climáticas. Além disso, sua persistência no solo, associada à elevada estabilidade do carbono e à presença de grupos funcionais reativos, possibilita efeitos duradouros sobre a qualidade do solo quando comparados aos obtidos por práticas corretivas convencionais.

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial do biocarvão como destino sustentável para resíduos agroindustriais. No contexto da cafeicultura, subprodutos como cascas, palhas e resíduos de poda podem ser convertidos em biocarvão por meio de pirólise controlada, cujas condições térmicas influenciam diretamente a qualidade do produto final. Essa estratégia reduz o passivo ambiental, promove a economia circular e possibilita a geração de insumos dentro da própria unidade produtiva, fortalecendo a autonomia dos sistemas produtivos e agregando valor a materiais que, de outra forma, poderiam representar fontes de contaminação ambiental ou riscos fitossanitários.

Do ponto de vista agrônomo, é importante destacar que o biocarvão deve ser compreendido como um condicionador de solo de efeito cumulativo, e não como um insumo de resposta imediata. Seus benefícios tendem a se manifestar de forma progressiva, especialmente em médio e longo prazo, o que exige planejamento e alinhamento das expectativas por parte dos produtores. Assim, sua utilização deve estar integrada a um conjunto mais amplo de práticas de manejo, incluindo adubação equilibrada, cobertura do solo, conservação da matéria orgânica e manejo adequado da água. Adicionalmente, o biocarvão pode favorecer a atividade microbiana e a ciclagem de nutrientes, reforçando processos biológicos essenciais à manutenção da qualidade do solo e ao funcionamento sustentável dos agroecossistemas.

Do ponto de vista econômico e ambiental, o uso do biocarvão pode estar associado a oportunidades emergentes, como a geração de créditos de carbono e a inserção em mercados que valorizam práticas produtivas sustentáveis. A crescente demanda por sistemas agrícolas capazes de conciliar produtividade, conservação ambiental e mitigação climática tende a ampliar o interesse por tecnologias baseadas no sequestro de carbono e na valorização de resíduos orgânicos. Contudo, sua adoção em larga escala ainda depende de fatores como custo de produção, disponibilidade tecnológica, capacitação técnica, infraestrutura adequada e comprovação de resultados consistentes em diferentes condições edafoclimáticas, especialmente em sistemas cafeeiros tropicais.

Apesar do potencial promissor, persistem lacunas científicas relevantes, especialmente quanto aos efeitos de longo prazo do biocarvão, à variabilidade de respostas em diferentes classes de solo, às interações com fertilizantes e corretivos e aos possíveis impactos ecotoxicológicos associados à sua utilização continuada. Adicionalmente, destaca-se a necessidade de padronização metodológica em experimentos de campo, condição fundamental para aumentar a comparabilidade entre estudos, reduzir incertezas e ampliar a robustez das recomendações técnicas destinadas aos produtores.

Por fim, a consolidação do biocarvão como tecnologia agrícola sustentável depende da integração entre pesquisa científica, inovação tecnológica, extensão rural e políticas públicas. A criação de marcos regulatórios, programas de incentivo, linhas de financiamento e estratégias de transferência de tecnologia será determinante para ampliar sua adoção em diferentes escalas produtivas. Nesse cenário, o biocarvão configura-se como uma ferramenta estratégica para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes, eficientes no uso de recursos, ambientalmente responsáveis e alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade, agricultura regenerativa e produção de baixo carbono.

7. Referências

ADEKIYA, A. O.; IBABA, A. L.; OGUNBODE, T. O.; ADEDOKUN, O. D. Biochar: a sustainable solution for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing

soil productivity: a review. **Scientifica**, v. 2026, artigo 5690423, 2026. DOI: 10.1155/sci5/5690423.

AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.

ALBURQUERQUE, J. A.; SALAZAR, P.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; DEL CAMPILLO, M. C.; GALLARDO, A.; VILLAR, R. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, p. 475-484, 2013.

ALVARENGA, A. C.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. de S.; RANGEL, O. J. P.; MOSA, L. L. Chemical attributes of an Oxisol added with conilon coffee straw biochar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.58, e03019, 2023.

ANDRADE, C. A. de; COSCIONE, A. R.; CHIBA, M. K.; PIRES, A. M. M.; MELO, L. C. A. **Biocarvão de resíduos agrícolas e urbanos**: potencial de uso agrícola e no sequestro de carbono. Campinas: Instituto Agronômico, 2020. 36 p. (Série Tecnologia IAC, 116).

BEKCHANOVA, M.; KUPPENS, T.; CUYPERS, A.; JOZEFCEZAK, M.; MALINA, R. Biochar's effect on the soil carbon cycle: a rapid review and meta-analysis. **Biochar**, v. 6, artigo 88, 2024. DOI: 10.1007/s42773-024-00381-8.

BRUUN, E. W.; HAMBURG, S. P.; EGSGAARD, H.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Biochar effect on the mineralization of soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 46, p. 1-8, 2012. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.09.006.

CARNEIRO, J. S. S.; RIBEIRO, I. C. A.; NARDIS, B. O.; BARBOSA, C. F.; LUSTOSA FILHO, J. F.; MELO, L. C. A. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: agronomic efficiency and phosphorus availability. **Science of the Total Environment**, v. 732, p. 143955, 2021.

CHEN, T.; ZHANG, Y.; WANG, H.; LI, W.; ZHOU, Z.; YUANCHENG; RONG, L. CONESA, J. A.; FONT, R.; FULLANA, A.; MARTÍN-GULLÓN, I.; ARACIL, I.; D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.

CONESA, J. A.; FONT, R.; MARCILLA, A.; GARCÍA, A. N. Pyrolysis of sewage sludge: influence of temperature on product yield and composition. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 85, n. 1-2, p. 134-141, 2009.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Aproveitamento de resíduos da agroindústria do café**. Brasília: Embrapa, 2013.

ENEBE, M. C.; RAY, R. L.; GRIFFIN, R. W. The impacts of biochar on carbon sequestration, soil processes, and microbial communities: a review. **Biochar**, v. 7, artigo 107, 2025. DOI: 10.1007/s42773-025-00499-3.

FALCÃO, N. P. S.; CLEMENT, C. R.; TSAI, S. M.; COMERFORD, N. B. Pedology, fertility, and biology of Central Amazonian Dark Earths. In: WOODS, W. I. et al. (org.). **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's vision**. Dordrecht: Springer, 2009. p. 213-238.

FERREIRA, F. J. P.; SANTO, L. M. do E.; SANTOS, C. A. dos; BREDA, F. A. da F.; SOUZA, C. da C. B.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Efeito da adição de biocarvão na eficiência do processo de compostagem da cama de frango. **Anais... 6º Simpósio ABC (Argentina-Brasil-Cuba)**, p. 92-98, 2017.

FREITAS, P. S. L. de; IVONILSON, L.; REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A. Influência da aplicação de biochar nas propriedades físicas e hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 3, n. 4, p. 54-61, 2016.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 4, p. 219-230, 2002.

GUIMARÃES, P. T. G.; REIS, T. H. P.; MARTINEZ, H. E. P. **Cafeeiro: manejo da fertilidade do solo e adubação**. Brasília, DF: Embrapa, 2022.

GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G.; SOUZA, C. A. S. **Cafeicultura: técnicas de produção sustentável**. Lavras: UFLA, 2016.

IBI. International Biochar Initiative. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil**, 2015. Disponível em: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2020/06/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final2.pdf. Acesso em: 22 abr. 2026.

JIEN, S. H.; WANG, C. S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. **Catena**, v. 110, p. 225–233, 2013.

KOOKANA, R. S. The role of biochar in modifying the environmental fate, bioavailability, and efficacy of pesticides in soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 627-637, 2010.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2009.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: Science technology and implementation**. 2. ed. Nova York: Routledge, 2015.

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**, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZAO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1719-1730, 2006.

LIMA, A. M.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; MONTEIRO FILHO, A. F.; CORRÊA, É. B.; DUARTE, M. S. B.; KUBO, G. T. M.. Phosphorus adsorption after the incubation of clay soil with different doses of biochar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 48, e016724, 2024.

LORENZ, K.; LAL, R. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 5, p. 651-670, 2014.

MACEDO, I.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gas emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582–595, 2008.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S. J.; LEHMANN, J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. **Plant and Soil**, v. 333, n. 1-2, p. 117–128, 2010.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. Acesso em: 22 abr. 2026.

MANGUTI, V.; CELESTINO, C. A.; OLIVEIRA, F. C. C.; ALVES, P. R. L.; MELO, L. C. A. Biochar selection for sustainable agriculture: a carbon stability and nutrient availability approach. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 77, n. 2, e20180214, 2020. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0214.

MARIN, F.; TANISLAV, O. M.; CONSTANTINESCU, M.; ROMAN, A.; BUCURA, F.; OANCEA, S.; ZAHARIOIU, A. M. Biochar for soil fertility and climate mitigation: review on feedstocks, pyrolysis conditions, functional properties, and applications with emerging AI integration. **Agriculture**, v. 15, n. 22, artigo 2345, 2025. DOI: 10.3390/agriculture15222345.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. Varginha, MG: Fundação Procafé, 2020. 714 p.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2010.

MELO, M. R. P. **Biochar como aditivo no processo de compostagem**. 2019. 94 f. Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2019.

MOURA, D. L.; PASSOS, R. R.; RANGEL, O. J. P.; SOUZA, C. O.; FERREIRA, A. F.; RIBEIRO, I. C. A. Biochar as a soil conditioner in coffee cultivation systems: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 323, p. 107697, 2022.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 313–339, 2013.

NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NIANDOU, M. A. S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. **Soil Science, Baltimore**, v. 175, n. 2, p. 105–112, 2010. DOI: 10.1097/SS.0b013e3181cb7f37.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321–344, 2015.

OLIVEIRA, F. S. DE; DESTEFANI, J. D.; , TAVARES, L. R.; PÁSCHOA, J. C. V. DA; CRESPO, A. M.; ARAUJO, O. P.; PEIXOTO, P. M. C.; SIQUEIRA, C. B.; CORTAT, L. H.; SOUZA, M. N. Microrganismos simbiotes: fixação biológica de nitrogênio e recuperação de pastagens degradadas. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. II. Canoas: Mérida Publishers Ltda. 2021. p. 243-275. <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-2-9.c6>

PAZ-FERREIRO, J.; LU, H.; FU, S.; MÉNDEZ, A.; GASCÓ, G. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. **Solid Earth**, v. 5, n. 1, p. 65–75, 2014.

PRADO, R. M.; NATALE, W.; ROZANE, D. E. **Nutrição, calagem e adubação do cafeeiro**. Piracicaba: Oficina de Textos, 2021.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.

REICHERT, J. M.; NORTON, L. D.; HUANG, C. Settling velocity of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 94, n. 1, p. 46–55, 2007.

SHYAM, S.; AHMED, S.; JOSHI, S. J.; SARMA, H. Biochar as a soil amendment: implications for soil health, carbon sequestration, and climate resilience. **Discover Soil**, v. 2, artigo 18, 2025. DOI: 10.1007/s44378-025-00041-8.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

SILVA, L. C. R.; CORRÊA, R. S.; WRIGHT, J. L.; BOMFIM, B.; HENDRICKS, L.; GAVIN, D. G.; MUNIZ, A. W.; MARTINS, G. C.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; MELO, V. de F.; YOUNG, S. D.; BROADLEY, M. R.; SANTOS, R. V. A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, v. 12, Art. 127, 2021.

SOUZA, C. de O.; RANGEL, O. J. P.; PASSOS, R. R. **Biocarvões como condicionadores dos atributos do solo**. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em Agroecologia**. v. 4. Alegre: Ifes, 2023. cap. 16, p. 225-240.

SOUZA, C. de O.; SILVA, M. A. B. da; RANGEL, O. J. P.; SOUZA, M. N. Dinâmica da matéria orgânica em diferentes sistemas de manejo do solo. In: RANGEL, O. J. P. *et al.* (org.). **Tópicos em agroecologia: volume V**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026. p. 146-155. 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. Conversão da agricultura convencional para agroecológica. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 123-130. ISBN: 978-65-84548-44-2. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c7>.

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>.

SPOKAS, K. A.; CANTRELL, K. B.; NOVAK, J. M.; ARCHER, D. W.; IPPOLITO, J. A.; COLLINS, H. P.; BOATENG, A. A.; LIMA, I. M.; LAMMIRATO, C.; AHMEDNA, M.; NIANDOU, M. A. S. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 41, n. 4, p. 973-989, 2012. DOI: 10.2134/jeq2011.0069.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; MACÊDO, J. L. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 291, n. 1-2, p. 275–290, 2007. DOI: 10.1007/s11104-007-9193-9.

TAN, C.; ZHANG, Y.; WANG, H.; LU, W.; ZHOU, Z.; ZHANG, Y.; REN, L. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorption performance of biochar derived from municipal sewage sludge. **Bioresource Technology**, v. 164, p. 47–54, 2014.

TEIXEIRA, W. G.; LOPES, A. F.; MADARI, B. E.; MARIMON JUNIOR, B. H. **Biocarvão como condicionador de solo: processos de produção, caracterização e utilização**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2015. 172 p.

TORRES, G. N.; AMORIM, R. S.; FARIA, O. C. O. Water retention in sandy soils of different origins with the addition of biochar. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 37, e11792, 2024.

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 1, n. 56, 2010.

ZACARIAS, A. J.; PASSOS, R. R.; RANGEL, O. J. P.; SANTOS, D. A.; SARTORI, A. F.; SOUZA, M. N.; REPOSSI, B. F. Biocarvão como condicionador do solo cultivado com eucalipto In: **Tópicos em Agroecologia vol. III**. 1 ed. VITÓRIA: Edifes, 2022, v.3, p. 299-315.

ZHANG, A.; BIAN, R.; PAN, G.; CUI, L.; HUSSAIN, Q.; LI, L. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of two consecutive rice-growing cycles. **Field Crops Research**, v. 127, p. 153-160, 2016.

ZHAO, X.; WANG, J.; WANG, S.; XING, G. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: a pot experiment with two rice/wheat rotations in China. ***Plant and Soil***, v. 378, p. 279–294, 2014.