BIOCHAR COMO ESTRATÉGIA DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E EFICIÊNCIA OPERACIONAL NAS AGROINDÚSTRIAS

Julia de Souza Santiago, Manuela Ribeiro Nogueira, Thainá Helena Calabrez Tirado, João Batista do Prado Junior.

Fundação Valeparaibana de Ensino, Unidade Centro, Rua Paraibuna, 75, Centro – 12245-720 – São José dos Campos-SP, Brasil, juliasantiagosalles2108@gmail.com, manunogrib08@gmail.com, thaina.tirado.020908@alunosjc.sp.gov.br, jbprado@univap.br.

Resumo

Este trabalho analisa a aplicação do *biochar* como estratégia de sustentabilidade ambiental e eficiência operacional nas agroindústrias. Realizou-se uma revisão bibliográfica narrativa, descritiva e qualitativa, com apoio de estudos científicos e documentos institucionais sobre manejo do solo, fertilizantes, resíduos, avaliação econômica e certificação de carbono. A literatura indica que o *biochar* pode favorecer a retenção de água e nutrientes, o aproveitamento de resíduos e o armazenamento de carbono, embora os efeitos dependam da matéria-prima, da tecnologia, do solo e das condições de aplicação. Sob a perspectiva administrativa, esses benefícios devem ser relacionados ao planejamento de suprimentos, à logística, aos custos, aos investimentos e às oportunidades de mercado. Conclui-se que o *biochar* apresenta potencial para integrar sustentabilidade e gestão empresarial, desde que sua adoção seja precedida por avaliação técnica e financeira local e acompanhada por indicadores verificáveis.
Palavras-chave: *Biochar*. Gestão ambiental. Eficiência operacional. Agroindústria. Economia circular.
Área do Conhecimento: Ciências Sociais Aplicadas – Administração.

Introdução

Um estudo divulgado a partir de pesquisas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP) indicou que 64% dos solos do planeta são arenosos e, por isso, apresentam maior fragilidade associada à baixa retenção de água e nutrientes, aos riscos de erosão e à menor produtividade (Pereira, 2025). No Brasil, a dependência externa de fertilizantes também amplia a vulnerabilidade do setor agroindustrial: no lançamento do Plano Nacional de Fertilizantes, o Ministério de Minas e Energia informou que, em 2022, as importações correspondiam a 85% da demanda nacional (Brasil, 2022). Além dos custos e riscos de abastecimento, o uso inadequado de fertilizantes pode gerar impactos ambientais, reforçando a necessidade de estratégias que melhorem o aproveitamento dos insumos e a conservação dos recursos produtivos (Barros, 2021).

Nesse cenário, a sustentabilidade passa a integrar decisões de gestão relacionadas à eficiência operacional, à destinação de resíduos e à competitividade. Práticas de economia circular procuram manter materiais em uso por mais tempo, reduzir desperdícios e transformar subprodutos em novos recursos. No setor agroindustrial, essa lógica pode aproximar gestão ambiental e estratégia empresarial, especialmente quando a solução adotada reduz perdas, organiza fluxos de resíduos e cria possibilidades de inovação ou geração de valor, sem que esses ganhos sejam presumidos antes de sua avaliação (Kurniawan et al., 2023; Li et al., 2022).

Entre as alternativas discutidas na literatura destaca-se o *biochar*, material carbonáceo obtido principalmente pela pirólise de biomassa em condições de baixa ou ausência de oxigênio. Resíduos agrícolas, florestais, agroindustriais e de origem animal podem ser convertidos em um material rico em carbono e relativamente estável; entretanto, suas características dependem da matéria-prima e dos parâmetros de produção (Boschiero, 2023; Leng; Huang, 2018; Universidade Federal de Lavras, 2016). A elevada porosidade e a área superficial do material podem favorecer a retenção hídrica e de nutrientes, reduzir perdas por lixiviação e melhorar condições físicas do solo, enquanto o carbono mais estável pode contribuir para estratégias de mitigação climática (Blanco-Canqui, 2017; Joseph et al., 2021; Lehmann et al., 2021; Schmidt et al., 2021).

Para a Administração, esses efeitos técnicos interessam quando são traduzidos em decisões sobre compras, produção, logística, aproveitamento de resíduos. A viabilidade pode variar conforme escala, disponibilidade e umidade da biomassa, distância de transporte, tecnologia adotada, preço do produto

e possibilidade de receitas complementares, como créditos de carbono (Gamaralalage et al., 2025; Nosenzo, 2025; Verra, 2025). Diante disso, o objetivo deste trabalho é analisar a aplicação do *biochar* como estratégia de sustentabilidade ambiental e eficiência operacional nas agroindústrias, relacionando seus benefícios técnicos à gestão de resíduos, à cadeia de suprimentos e às oportunidades de negócio.

Metodologia

A pesquisa consiste em revisão bibliográfica narrativa, de caráter descritivo e abordagem qualitativa, com apoio de documentos institucionais. O levantamento inicial ocorreu entre abril e agosto de 2026, mediante consultas à SciELO, ao Portal de Periódicos CAPES, a livros, artigos científicos, dissertações, teses e publicações relacionadas ao tema. Na revisão do manuscrito, em setembro de 2026, foram conferidas as referências e incorporadas fontes complementares sobre avaliação técnico-econômica, gestão de resíduos, fertilizantes e certificação de carbono.

Os descritores empregados incluíram "*Biochar*", "Sustentabilidade Ambiental", "Eficiência Operacional", "Economia Circular", "Gestão Ambiental", análise técnico-econômica, resíduos, fertilizantes e créditos de carbono, em português e inglês. Foram priorizadas fontes com autoria e origem identificáveis, diretamente relacionadas à aplicação do *biochar*, aos seus efeitos ambientais e operacionais e às decisões administrativas no contexto agroindustrial. Estudos clássicos foram mantidos quando relevantes à fundamentação teórica.

A análise foi realizada de forma qualitativa e interpretativa, organizando as informações em três eixos: efeitos técnicos e eficiência de insumos; resíduos e economia circular; suprimentos e logística; e comunicação ambiental e oportunidades de mercado. Foram diferenciados os achados das fontes, as condições de aplicação e as interpretações gerenciais propostas neste artigo. Não houve coleta de dados em empresas, experimentos, entrevistas ou cálculo de indicadores financeiros, o que limita a generalização dos resultados.

Resultados

A literatura consultada evidencia que o *biochar* pode melhorar propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, especialmente em áreas arenosas ou degradadas, mas com respostas dependentes do material utilizado e das condições locais. Sua estrutura porosa pode aumentar a retenção de água, melhorar a aeração e favorecer o desenvolvimento das raízes, aspectos relevantes em solos com baixa capacidade de retenção hídrica (Blanco-Canqui, 2017; Boschiero, 2023; Joseph et al., 2021).

Em relação aos nutrientes, os estudos indicam potencial de aumento da capacidade de retenção e redução de perdas por lixiviação, contribuindo para um uso mais eficiente da fertilização convencional. Também são relatadas condições favoráveis à atividade microbiana e à ciclagem de nutrientes. Esses resultados não significam substituição automática dos fertilizantes, mas sustentam a avaliação do *biochar* como complemento do manejo, sobretudo diante da necessidade de reduzir perdas de insumos (Boschiero, 2023; Joseph et al., 2021; Schmidt et al., 2021).

Outro conjunto de resultados relaciona o *biochar* à sustentabilidade dos sistemas produtivos. A utilização de resíduos agrícolas, florestais e agroindustriais como matéria-prima pode criar uma rota de aproveitamento de materiais, enquanto a estabilidade do carbono permite discutir sua contribuição para armazenamento de carbono e mitigação climática (Kurniawan et al., 2023; Lehmann et al., 2021). A Tabela 1 sintetiza esses benefícios técnicos e sua possível tradução em decisões administrativas.

Tabela 1 – Benefícios potenciais do *biochar* e implicações para a gestão agroindustrial

Aspecto	Evidência técnica ou possibilidade	Decisão administrativa associada
Água e estrutura	Pode elevar retenção hídrica, porosidade e aeração.	Medir consumo hídrico, produtividade e custo total.
Nutrientes e biologia	Pode reduzir lixiviação e favorecer ciclagem de nutrientes.	Comparar doses, fertilização e desempenho por unidade produzida.
Aproveitamento de resíduos	Biomassas residuais podem ganhar uso produtivo.	Comparar destinos, logística, sazonalidade e custo de oportunidade.
Armazenamento de carbono	Carbono estável pode contribuir para remoções de longo prazo.	Avaliar emissões, elegibilidade e custos de certificação.

Fonte: elaboração dos autores, com base em Blanco-Canqui (2017), Boschiero (2023), Joseph et al. (2021), Lehmann et al. (2021), Schmidt et al. (2021) e Verra (2025).

Na dimensão econômica, Nosenzo (2025) apresenta cenários de produção de *biochar* a partir de bagaço de cana-de-açúcar no Brasil e mostra que escala, disponibilidade de matéria-prima, aplicação no solo e preço dos créditos de carbono alteram a viabilidade. Como se trata de modelagem divulgada em preprint, os resultados servem para identificar variáveis de decisão, não para comprovar retorno financeiro em agroindústrias locais.

Gamaralalage et al. (2025), em contexto distinto do brasileiro, observaram que a proximidade entre a geração do resíduo e a unidade de processamento reduziu a necessidade de transporte e que as condições de fornecimento influenciaram a viabilidade. O estudo reforça a importância de avaliar localização, umidade, volume e regularidade da biomassa antes de definir tecnologia e capacidade de processamento.

No campo da gestão ambiental, a GRI 306 orienta o registro de resíduos gerados, recuperados e destinados à disposição, inclusive na cadeia de valor (Global Reporting Initiative, 2020). A metodologia VM0044, por sua vez, estabelece critérios para quantificar remoções de carbono associadas ao uso de *biochar* e exige condições específicas para certificação (Verra, 2025). Essas referências apoiam a construção dos critérios gerenciais sintetizados na Tabela 2, mas não demonstram, por si só, aumento de reputação, vendas ou lucro.

Tabela 2 – Critérios gerenciais propostos para avaliar a adoção do *biochar*

Dimensão	Indicador ou informação	Finalidade na decisão
Resíduos e logística	Massa disponível, sazonalidade, umidade, distância e custo de transporte.	Dimensionar capacidade e contratos de fornecimento.
Gestão ambiental	Resíduos gerados e recuperados, energia, emissões e indicadores técnicos.	Acompanhar impactos e sustentar comunicação verificável.
Mercado de carbono	Remoções elegíveis, despesas de certificação e receita líquida.	Testar a dependência do projeto em relação aos créditos.

Fonte: elaboração dos autores, a partir de Global Reporting Initiative (2020), Gamaralalage et al. (2025), Nosenzo (2025) e Verra (2025). Os indicadores são propostas deste artigo.

Discussão

A integração dos resultados técnicos com a Administração exige separar benefício agronômico, eficiência operacional e retorno do investimento. A retenção de água e nutrientes pode reduzir perdas e justificar testes de eficiência, mas não permite afirmar antecipadamente que haverá redução de custos. Recomenda-se comparar o manejo atual com o manejo acrescido de *biochar*, registrando doses, produtividade, consumo de água, uso de fertilizantes e custo total. Essa abordagem transforma os efeitos descritos por Blanco-Canqui (2017), Joseph et al. (2021) e Schmidt et al. (2021) em indicadores de decisão.

A fragilidade dos solos arenosos destacada por Pereira (2025) e a dependência brasileira de fertilizantes apresentada por Brasil (2022) ampliam a relevância da eficiência de recursos para as agroindústrias. Se a menor lixiviação e o melhor aproveitamento de nutrientes forem confirmados em uma operação, pode haver menor necessidade de reposição de insumos; contudo, preços, câmbio, área cultivada e produtividade também afetam o gasto. Por isso, qualquer redução de despesa deve ser analisada com controle dessas variáveis, evitando atribuir ao *biochar* economias não demonstradas.

Na gestão de resíduos e da cadeia de suprimentos, a possibilidade de produzir *biochar* a partir de biomassas residuais aproxima o tema dos princípios da economia circular discutidos por Kurniawan et al. (2023) e Li et al. (2022). Entretanto, resíduo disponível não significa matéria-prima gratuita. A empresa precisa mapear origem, quantidade, sazonalidade, umidade, destino atual e distância até o processamento, além de comparar produção própria, contratação de terceiros e compra do produto. Os resultados de Gamaralalage et al. (2025) e os cenários de Nosenzo (2025) reforçam que logística e escala podem alterar a viabilidade.

A decisão de investimento deve considerar equipamentos, infraestrutura, energia, pessoal, manutenção, transporte, aplicação e controle de qualidade. Em estudos futuros ou projetos-piloto, o fluxo de caixa pode ser utilizado para calcular valor presente líquido, taxa interna de retorno e prazo de recuperação do investimento, com cenários conservador, intermediário e favorável. Essas ferramentas

não foram calculadas nesta revisão; são propostas para que os benefícios ambientais sejam confrontados com custos reais antes da expansão da iniciativa.

O armazenamento de carbono e a gestão sustentável de resíduos também podem apoiar posicionamento ambiental e oportunidades de mercado, porém exigem comprovação. A VM0044 condiciona a geração de créditos a critérios de elegibilidade, adicionalidade, monitoramento e verificação (Verra, 2025), enquanto a GRI 306 oferece referência para documentar fluxos de resíduos (Global Reporting Initiative, 2020). Assim, imagem institucional e geração de receita devem ser tratadas como potenciais resultados a serem medidos. A principal lacuna identificada é justamente integrar, em escala local, desempenho técnico, custos, logística, indicadores ambientais e aceitação de mercado em uma mesma avaliação gerencial.

Conclusão

O *biochar* apresenta potencial para integrar sustentabilidade ambiental e eficiência operacional nas agroindústrias, pois reúne possibilidades de melhoria do uso de água e nutrientes, aproveitamento de resíduos e armazenamento de carbono. A contribuição para a Administração está em transformar esses benefícios técnicos em decisões verificáveis sobre suprimentos, logística, custos, investimentos, gestão ambiental e oportunidades de mercado.

A revisão sustenta a pertinência de avaliar essa alternativa, mas não comprova rentabilidade universal, redução automática de fertilizantes ou ganhos garantidos de reputação e receita. Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a realização de avaliações técnicas e financeiras das condições locais para a adoção da tecnologia, preferencialmente por meio de projetos-piloto. Esses estudos deverão considerar indicadores de produtividade, custos, geração de resíduos, emissões e qualidade do produto. Dessa forma, será possível identificar, de maneira mais precisa, em quais condições os benefícios ambientais observados podem se converter efetivamente em vantagens administrativas e oportunidades de negócio.

Referências

BARROS, Talita Delgrossi. Biofertilizantes. Portal Embrapa, Brasília, DF, 8 dez. 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biofertilizantes. Acesso em: 29 maio 2026.

BLANCO-CANQUI, Humberto. *Biochar* and soil physical properties. Soil Science Society of America Journal, v. 81, n. 4, p. 687-711, 2017. DOI: 10.2136/sssaj2017.01.0017.

BOSCHIERO, Beatriz Nastaro. *Biochar* ou biocarvão: o que é e qual seu potencial de uso na agricultura? AgroAdvance, Piracicaba, 11 abr. 2023. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-*biochar*-biocarvao-uso-na-agricultura/. Acesso em: 28 maio 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Governo Federal lança Plano Nacional de Fertilizantes para reduzir importação dos insumos. Brasília, DF, 11 mar. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/governo-federal-lanca-plano-nacional-de-fertilizantes-para-reduzir-importacao-dos-insumos. Acesso em: 11 set. 2026.

GAMARALALAGE, Disni et al. Biowaste to *biochar*: a techno-economic and life cycle assessment of *biochar* production from food-waste digestate and its agricultural field application. *Biochar*, v. 7, art. 50, 2025. DOI: 10.1007/s42773-025-00456-0.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE. GRI 306: Waste 2020. Amsterdam: GRI, 2020. Disponível em: https://www.globalreporting.org/pdf.ashx?id=12521. Acesso em: 11 set. 2026.

JOSEPH, Stephen et al. How *biochar* works, and when it doesn't: a review of mechanisms controlling soil and plant responses to *biochar*. GCB Bioenergy, v. 13, n. 11, p. 1731-1764, 2021. DOI: 10.1111/gcbb.12885.

KURNIAWAN, Tonni Agustiono et al. Challenges and opportunities for *biochar* to promote circular economy and carbon neutrality. Journal of Environmental Management, v. 332, 117429, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117429.

LEHMANN, Johannes et al. *Biochar* in climate change mitigation. Nature Geoscience, v. 14, n. 12, p. 883-892, 2021. DOI: 10.1038/s41561-021-00852-8.

LENG, Lijian; HUANG, Huajun. An overview of the effect of pyrolysis process parameters on *biochar* stability. Bioresource Technology, v. 270, p. 627-642, 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.09.030.

LI, Jie et al. Wet wastes to bioenergy and *biochar*: a critical review with future perspectives. Science of the Total Environment, v. 817, 152921, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.152921.

NOSENZO, Sebastian G. Evaluating sugarcane bagasse-based *biochar* as an economically viable catalyst for agricultural and environmental advancement in Brazil through scenario-based economic modeling. arXiv, 2025. Preprint. arXiv:2508.12454. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2508.12454. Acesso em: 11 set. 2026.

PEREIRA, Rodrigo. Estudo da USP revela que 64% dos solos do mundo são frágeis e alerta para impactos na agricultura e meio ambiente. g1, Piracicaba, 30 jul. 2025. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2025/07/30/estudo-da-usp-revela-que-64percent-dos-solos-do-mundo-sao-frageis-e-alerta-para-impactos-na-agricultura-e-meio-ambiente.ghtml. Acesso em: 30 maio 2026.

SCHMIDT, Hans-Peter et al. *Biochar* in agriculture: a systematic review of 26 global meta-analyses. GCB Bioenergy, v. 13, n. 11, p. 1708-1730, 2021. DOI: 10.1111/gcbb.12889.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Biocarvão é tema de treinamento na UFLA com a presença de especialistas nacionais e internacionais. UFLA, Lavras, 31 ago. 2016. Disponível em: https://www.ufla.br/dcom/2016/08/31/biocarvao-e-tema-de-treinamento-na-ufla-com-a-presenca-de-especialistas-nacionais-e-internacionais/. Acesso em: 28 maio 2026.

VERRA. VM0044 *Biochar* Utilization in Soil and Non-Soil Applications. Version 1.2. Washington, DC: Verra, 2025. Disponível em: https://verra.org/methodologies/vm0044-*biochar*-utilization-in-soil-and-non-soil-applications-v1-2/. Acesso em: 11 set. 2026.