

Valorização do bagaço de malte por conversão em biocarvão e aplicações na cadeia produtiva da cerveja

DOI: 10.5281/zenodo.17507871

Diego Coelho Barroso dos Santos,^{a*} Luana Barbosa Oliveira,^a Guilherme Fonseca Barbosa,^a Mariana M. Moutinho,^a Julia Saemi F. Yasuda,^a Vitoria Domenick G. R. M. Trovão^a e Grace F. Ghesti^a

This theoretical study explores the valorization of brewer's spent grain (BSG) by conversion into biochar for reintegration into the brewing process. Four key applications are proposed: (i) filtration, as a sustainable alternative to diatomaceous earth; (ii) selective adsorption of off-flavor compounds; (iii) low-cost water treatment; and (iv) functional support for enzyme and yeast immobilization. The methodology includes biochar production via pyrolysis or hydrothermal carbonization, followed by activation (physical/chemical) to enhance surface area and functional groups. Standard characterization techniques (BET, SEM, FTIR) are suggested for assessment. This strategy aligns with circular economy principles by converting residues into value-added materials, offering a basis for experimental validation to reduce waste, lower costs, and promote sustainable innovation in brewing.

Este estudo teórico explora a valorização do bagaço de malte (BSG) através da sua conversão em biocarvão para reintegração no processo cervejeiro. Quatro aplicações principais são propostas: (i) filtração, como alternativa sustentável à terra diatomácea; (ii) adsorção seletiva de compostos indesejados (off-flavors); (iii) tratamento de água de baixo custo; e (iv) suporte funcional para imobilização de enzimas e leveduras. A metodologia inclui a produção de biocarvão via pirólise ou carbonização hidrotérmica, seguida de ativação (física/química) para otimizar a área superficial e grupos funcionais. Técnicas de caracterização padrão (BET, SEM, FTIR) são sugeridas para avaliação. Esta estratégia alinha-se aos princípios da economia circular ao converter resíduos em materiais de valor agregado, oferecendo uma base para validação experimental a fim de reduzir resíduos, custos e promover a inovação sustentável na produção de cerveja.

^aUniversidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Química (IQ/UnB), Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis.

*E-mail: santosdcb@gmail.com

Palavras-chave: Valorização; Bagaço de malte (BSG); Biochar; Produção de cerveja; Economia circular.

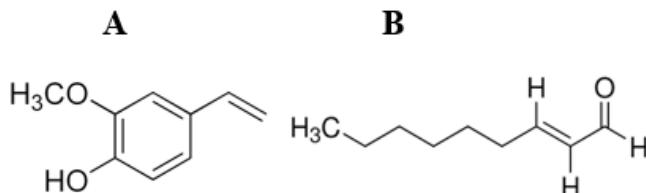
Recebido em 20 de agosto de 2025,
Aprovado em 28 de outubro de 2025,
Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A produção de cerveja artesanal é um processo biotecnológico que integra diversas etapas químicas, térmicas e microbiológicas, envolvendo uma cadeia produtiva complexa e economicamente relevante. Além de representar uma prática cultural e social consolidada, o processo permite a aplicação prática de conceitos fundamentais como balanço de massa, transformações enzimáticas, fermentação alcoólica e análises físico-química.^{1,2} Do ponto de vista técnico, a produção cervejeira é composta por etapas críticas como a brassagem, a fervura, a fermentação, a maturação e o envase, as quais influenciam diretamente as propriedades sensoriais e físico-químicas da bebida final.² A qualidade da água empregada no processo desempenha papel central, afetando diretamente as características sensoriais e a estabilidade da cerveja.³ Impurezas orgânicas ou inorgânicas, variações no pH e a presença de metais ou compostos sulfurados podem comprometer a fermentação, o sabor e a aparência da bebida.⁴

Paralelamente, a formação de *off-flavors* (compostos que conferem sabores ou aromas indesejáveis, como 4-vinilguaiacol e trans-2-nonenal) pode ocorrer ao longo da produção, especialmente em condições inadequadas de fermentação ou envelhecimento, impactando negativamente a aceitação sensorial do produto.⁵ A etapa de filtração também exerce papel fundamental, sendo responsável pela redução de turbidez, remoção de leveduras e outras partículas suspensas, além de contribuir para a estabilidade microbiológica e sensorial da cerveja. O tipo de material filtrante utilizado pode influenciar a eficiência da clarificação e a retenção de compostos desejáveis ou indesejáveis.⁶

Figura 1. Estruturas do (A) 4-vinilguaiacol e (B) trans-2-nonenal. Produzido pelos autores.



Nesse contexto, destaca-se o bagaço de malte (brewer's spent grain – BSG), subproduto lignocelulósico gerado em grandes volumes após a brassagem, composto majoritariamente por fibras vegetais, proteínas e frações residuais de amido.⁷ Durante a brassagem, esse resíduo é separado do mosto por processos de filtração e, geralmente, é destinado à alimentação animal ou descartado. No entanto, sua composição química rica em carbono e funcionalidade superficial torna o BSG um candidato promissor para conversão em biocarvão, um material carbonáceo obtido por pirólise ou processos térmicos relacionados, com estrutura porosa e funcionalidades químicas que permitem aplicações em áreas como adsorção, imobilização de biomoléculas, filtragem e purificação de líquidos.^{8,9}

O presente trabalho tem como objetivo explorar, sob uma perspectiva teórica, a valorização do BSG via produção de biocarvão e sua reinserção na cadeia produtiva da cerveja em aplicações que promovam sustentabilidade, economia circular e inovação tecnológica.

Metodologia

Este trabalho propõe uma abordagem teórica para o reaproveitamento do bagaço de malte (brewer's spent grain – BSG), resíduo lignocelulósico amplamente gerado na indústria cervejeira, por meio de sua conversão em biocarvão (biochar) com potencial aplicação em quatro etapas distintas da cadeia produtiva da cerveja: (i) filtração, (ii) adsorção de compostos indesejáveis, (iii) tratamento de água e (iv) imobilização de biomoléculas. A seguir, detalham-se os métodos sugeridos para produção, caracterização e aplicação desse material.

Produção e caracterização do biocarvão

O BSG deverá ser coletado logo após a brassagem, seco a 105 °C por 24 horas e moído até granulometria inferior a 2 mm. O biocarvão poderá ser obtido por: (a) Pirólise convencional: realizada entre 300 e 700 °C por 30 a 120 minutos em atmosfera de nitrogênio, sendo a temperatura um fator chave na definição da porosidade, funcionalização superficial e estabilidade química do material.¹⁰; (b) Carbonização hidrotermal (HTC): conduzida em reator fechado sob 180–250 °C por 4 a 8 horas, permitindo o uso de biomassa úmida e originando um hidrochar com características distintas.^{11,12}; e (c) Ativações físicas (com CO₂ a 800 °C) ou químicas (com KOH, ZnCl₂ ou H₃PO₄) podem ser aplicadas previamente para ampliar a área superficial e a funcionalidade superficial do biocarvão.¹³

Tabela 1. Produção e caracterização do biocarvão.

Etapa	Condições	Objetivo
Coleta do BSG	Após brassagem	Matéria-prima para biocarvão
Secagem	105 °C por 24h	Reduz umidade
Moagem	<2 mm	Homogeneizar granulometria
Pirólise convencional	300–700 °C, 30–120 min, atmosfera de N ₂	Produção de biocarvão com porosidade e estabilidade química definidas
Carbonização hidrotermal	180–250 °C, 4–8 h, biomassa úmida	Produção de hidrochar com propriedades distintas
Ativação física/química	CO ₂ 800 °C ou KOH/ZnCl ₂ /H ₃ PO ₄	Amplia área superficial e funcionalidade

Por fim, para garantir a adequação do material às diferentes aplicações, o biocarvão será caracterizado por: (i) Área superficial e porosidade (BET); (ii) Morfologia (MEV); (iii) Composição e cristalinidade (DRX e CHN); (iv) Grupos funcionais (FTIR e pHpzC); e (v) Teor de cinzas.⁸

Aplicações propostas e ensaios de validação

As seguintes aplicações foram selecionadas com base na viabilidade técnica e relevância para a cadeia produtiva da cerveja. Na filtração, o biocarvão será avaliado como coadjuvante na clarificação do mosto ou da cerveja, substituindo parcial ou totalmente materiais convencionais como terra diatomácea¹⁴. Ensaios comparativos utilizarão colunas ou sistemas em batelada, com análise de turbidez (nefelometria), tempo de filtração e coloração final (escala EBC). Na adsorção de compostos indesejáveis (off-flavors), o biocarvão será testado quanto à remoção de compostos como 4-vinilguaiacol, acetaldeído e trans-2-nonenal. Soluções modelo serão preparadas e submetidas a diferentes doses de biocarvão em batelada. A quantificação será realizada por cromatografia gasosa com espectrometria de massas (GC-MS).

No tratamento de água, a eficácia do biocarvão na remoção de contaminantes da água cervejeira⁸ será avaliada em sistemas de colunas contínuas ou em batelada. Os parâmetros analisados incluirão DQO, turbidez, cor aparente e metais pesados (por EAA). Modelos com adição artificial de Pb²⁺, Cd²⁺, fenol ou pesticidas serão utilizados como base de comparação. Na imobilização de biomoléculas, biocarvões previamente funcionalizados com grupos carboxílicos ou aminas serão testados como suporte para imobilização de enzimas (ex.: amilase) ou leveduras.¹⁵ Os ensaios serão conduzidos em sistemas descontínuos, com avaliação de consumo de glicose, produção de etanol e estabilidade da biomassa ao longo de diferentes ciclos fermentativos.

Tabela 2. Aplicações do Biocarvão na Produção de Cerveja.

Etapa	Aplicação	Parâmetros
Filtração	Clarificação do mosto/cerveja	Turbidez (nefelometria), tempo de filtração, coloração (EBC)
Adsorção de off-flavors	Remoção de compostos indesejáveis (4-vinilguaiacol, trans-2-nonenal, acetaldeído)	Quantificação por GC-MS
Tratamento de água	Remoção de contaminantes da água cervejeira	DQO, turbidez, cor aparente, metais pesados (EAA)
Imobilização de biomoléculas	Suporte para enzimas (ex.: amilase) ou leveduras	Consumo de glicose, produção de etanol, estabilidade da biomassa

Resultados e discussão

A proposta de valorização do bagaço de malte (BSG) por meio de sua conversão em biocarvão e reinserção em etapas do processo cervejeiro representa uma estratégia promissora sob a ótica da economia circular, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, a redução de custos operacionais e o reaproveitamento de resíduos de elevado volume.

Dentre as aplicações propostas, destaca-se a possibilidade de uso do biocarvão como auxiliar de filtração, substituindo materiais tradicionais como terra diatomácea, cuja

extração envolve impactos ambientais significativos e altos custos logísticos.¹⁶ A literatura indica que materiais carbonáceos porosos derivados de resíduos agroindustriais têm se mostrado eficazes na remoção de turbidez, coloração e partículas coloidais de soluções aquosas e bebidas fermentadas.¹⁷

No controle de off-flavors, o biocarvão pode atuar como adsorvente seletivo⁸ para compostos como aldeídos e fenóis voláteis, frequentemente associados à oxidação ou contaminação microbiológica durante a fermentação ou o armazenamento. Isso pode aumentar a estabilidade sensorial e ampliar a vida útil da cerveja, sem necessidade de aditivos químicos.

No que diz respeito à etapa de tratamento da água, a aplicação de biocarvão como adsorvente⁸ contribui para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes na água de processo, atendendo aos padrões de qualidade exigidos para a produção cervejeira. Estudos demonstram sua eficácia na redução de parâmetros como DQO, turbidez e metais pesados.¹⁸

Por fim, a imobilização de biomoléculas, como enzimas e leveduras, em suportes à base de biocarvão tem se mostrado uma abordagem viável para a melhoria da eficiência fermentativa, com vantagens em termos de reutilização do biocatalisador e estabilidade operacional. A literatura recente reforça o papel de materiais carbonáceos funcionalizados na retenção e estabilização de enzimas e microrganismos ativos em processos biotecnológicos.¹⁵

Embora teórica, esta proposta oferece um panorama para a integração do biocarvão derivado do BSG na indústria cervejeira. Para sua implementação prática, recomenda-se a realização de estudos-piloto em parceria com cervejarias artesanais e institutos de pesquisa, a fim de validar os benefícios técnicos, sensoriais e econômicos. Ensaios complementares poderão incluir análises de segurança alimentar, estabilidade de compostos voláteis e avaliação da viabilidade econômica frente aos materiais comerciais.

Conclusões

Este trabalho propôs uma abordagem teórica inovadora para a valorização do BSG por meio de sua conversão em biocarvão e aplicação em etapas estratégicas do processo produtivo da cerveja. As aplicações consideradas — filtração, adsorção de compostos indesejáveis, tratamento de

água e imobilização de biomoléculas — demonstram viabilidade técnica com base em evidências da literatura, reforçando o potencial do biocarvão como alternativa funcional e sustentável.

A proposta se alinha aos princípios da economia circular, ao promover o reaproveitamento de um resíduo volumoso e frequentemente descartado de forma inadequada, transformando-o em insumo útil para o próprio processo produtivo. As aplicações sugeridas podem contribuir para a melhoria da qualidade sensorial e físico-química da cerveja, além de promover práticas mais limpas e reduzir a dependência de insumos de origem mineral ou sintética.

Ainda que em estágio conceitual, os caminhos metodológicos delineados fornecem uma base sólida para a condução de estudos experimentais futuros. Como próximos passos, recomenda-se o desenvolvimento de testes laboratoriais e piloto, em colaboração com cervejarias e centros de pesquisa, de modo a validar os efeitos do biocarvão na prática e mensurar seus benefícios técnicos, sensoriais, ambientais e econômicos.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradecimentos ao LMCERVA e a Universidade de Brasília pelo apoio ao projeto.

Referências

- 1 A. Goyal, G. Shukla, S. Mishra, S. Mallik, A. Singh and M. Dubey, BEER PRODUCTION BY FERMENTATION PROCESS: A REVIEW, *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 2023, **13**.
- 2 V. Shopska, R. Denkova-Kostova and G. Kostov, Modeling in Brewing—A Review, *Processes*, 2022, **10**, 267.
- 3 Z. C. Hai, in 2011 International Conference on New Technology of Agricultural, IEEE, 2011.
- 4 L. Punčochářová, J. Pořízka, P. Diviš and V. Štursa, Study of the influence of brewing water on selected analytes in beer, *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2019, **13**, 507–514.
- 5 E. J. Pires, J. A. Teixeira, T. Brányik and A. A. Vicente, Yeast: the soul of beer's aroma—a review of flavour-active esters and higher alcohols produced by the brewing yeast, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**, 1937–1949.
- 6 H. Sun, Y. Zhang, J. Hao, D. Wang, T. Li, M. Wang and Q. Guo, A Rapid Method for Testing Filtration Performance of Malt and the Optimization of the Method, *Fermentation*, 2023, **9**, 613.
- 7 A. Chetrariu and A. Dabija, Spent Grain: A Functional Ingredient for Food Applications, *foods*, 2023, **12**, 1533.
- 8 D. C. B. D. Santos, R. B. W. Evaristo, R. C. Dutra, P. A. Z. Suarez, E. A. Silveira and G. F. Ghesti, Advancing Biochar Applications: A Review of Production Processes, Analytical Methods, Decision Criteria, and Pathways for Scalability and Certification, *Sustainability*, 2025, **17**, 2685.
- 9 R. Cancelliere, K. Carbone, M. Pagano, I. Cacciotti and L. Micheli, Biochar from Brewers' Spent Grain: A Green and Low-Cost Smart Material to Modify Screen-Printed Electrodes, *Biosensors*, 2019, **9**, 139.
- 10 M. J. Bardi, J. M. Mutunga, H. Ndiritu and K. Koch, Effect of pyrolysis temperature on the physiochemical properties of biochar and its potential use in anaerobic digestion: A critical review, *Environmental Technology & Innovation*, 2023, **32**, 103349.
- 11 M. Jackowski, D. Semba, A. Trusek, M. Wnukowski, L. Niedzwiecki, M. Baranowski, K. Krochmalny and H. Pawlak-Kruczek, Hydrothermal Carbonization of Brewery's Spent Grains for the Production of Solid Biofuels, *Beverages*, 2019, **5**, 12.
- 12 A. Lorente, J. Remón, M. Salgado, A. J. Huertas-Alonso, P. Sánchez-Verdú, A. Moreno and J. H. Clark, Sustainable Production of Solid Biofuels and Biomaterials by Microwave-Assisted, Hydrothermal Carbonization (MA-HTC) of Brewers' Spent Grain (BSG), *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, **8**, 18982–18991.
- 13 R. Geremias, C. Pelissari, N. Libardi, D. Carpiné and R. H. Ribani, Chromium adsorption studies using

brewer's spent grain biochar: kinetics, isotherm and thermodynamics, *Ciênc. Rural*, 2023, **53**.

- 14 O. Cadar, I. Vagner, I. Miu, D. Scurtu and M. Senila, Preparation, Characterization, and Performance of Natural Zeolites as Alternative Materials for Beer Filtration, *Materials*, 2023, **16**, 1914.
- 15 A. Antanasković, Z. Lopičić, S. Dimitrijević-Branković, N. Ilić, V. Adamović, T. Šoštaric and M. Milivojević, Biochar as an Enzyme Immobilization Support and Its Application for Dye Degradation, *Processes*, 2024, **12**, 2418.
- 16 K. Wolny-Koładka, M. Zdaniewicz, S. Bodziacki, P. Terebun, M. Kwiatkowski, D. Zarzeczny and J. Pawłat, Effect of Non-Equilibrium Plasma on Microorganisms Colonizing Diatomaceous Earth after the Beer Filtration Process, *Applied Sciences*, 2023, **13**, 4081.
- 17 F. García-Ávila, A. Galarza-Guamán, M. Barros-Bermeo, E. A. Alfaro-Paredes, A. Avilés-Añazco and S. Iglesias-Abad, Integration of high-rate filtration using waste-derived biochar as a potential sustainable technology for drinking water supply, *Biochar*, 2023, **5**, 62.
- 18 S. Wang, H. Zhang, J. Wang, H. Hou, C. Du, P.-C. Ma and A. Kadier, in *Biochar and its Application in Bioremediation*, eds. R. Thapar Kapoor, H. Treichel and M. P. Shah, Springer Nature Singapore, Singapore, 2021, 67–90.