Anais do Congresso Brasileiro de Iniciação Científica
(https://periodicos.unisanta.br/COB)

ISSN 2317-1316

AVALIAÇÃO TÉCNICO-EXPERIMENTAL DA REMOÇÃO DE COBRE EM CACHAÇA POR ADSORÇÃO COM CASCA DE OVO E CARVÃO ATIVADO

TECHNICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF COPPER REMOVAL FROM CACHAÇA BY ADSORPTION ONTO EGGSHELL AND ACTIVATED CARBON

Letícia Jatczak Almeida, Isabella de Lorena Silva Gonçalves, João Victor Ferreira dos Santos, Nelize Maria de Almeida Coêlho, Vitor da Silva Rosa

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Química
E-mail para contato: leticiajatczak4@gmail.com

RESUMO – A contaminação da cachaça por cobre pode comprometer sua qualidade, a segurança do consumidor e sua comercialização em mercados mais exigentes. Este estudo avaliou a remoção do metal por adsorção, comparando carvão ativado e casca de ovo nas granulometrias de 42 e 80 mesh. Os ensaios de equilíbrio e cinética foram analisados por modelos matemáticos de adsorção e transporte. A casca de ovo 80 mesh apresentou o melhor desempenho geral, e os dados ajustaram-se melhor aos modelos de Freundlich, para o equilíbrio, e de pseudo-segunda ordem, para a cinética. As análises complementares indicaram predominância de adsorção física e participação conjunta da difusão intrapartícula e do transporte externo, resultados que reforçam o potencial da casca de ovo na descontaminação da bebida.

Palavras-chave: Cachaça; Remoção de cobre; Adsorção; Casca de ovo; Carvão ativado.

ABSTRACT – Copper contamination in cachaça can compromise beverage quality, consumer safety, and access to more demanding markets. This study evaluated copper removal by adsorption using activated carbon and eggshell particles of 42 and 80 mesh. Equilibrium and kinetic data were analyzed using mathematical models of adsorption and mass transfer. The 80-mesh eggshell showed the best overall performance. The equilibrium data were best described by the Freundlich model, whereas the kinetic data followed the pseudo-second-order model. Additional analyses indicated predominantly physical adsorption, with both intraparticle diffusion and external mass transfer contributing to the process, reinforcing the potential of eggshell as an alternative adsorbent for cachaça decontamination.

Keywords: Cachaça; Copper removal; Adsorption; Eggshell; Activated carbon.

ISSN 2317-1316

1 INTRODUÇÃO

A cachaça acompanha a história do Brasil desde o período colonial e, com o passar do tempo, tornou-se um produto de forte valor cultural e econômico. Sua elaboração está relacionada ao aproveitamento de matérias-primas provenientes da cana-de-açúcar e pode ocorrer por processos industriais ou artesanais, que apresentam diferenças quanto às técnicas, aos equipamentos e às características do produto obtido. Nas últimas décadas, a maior valorização da bebida e sua inserção em mercados externos aumentaram a necessidade de controle da qualidade e de atendimento às exigências sanitárias e comerciais (Coutinho et al., 2012; Saes e Kolya, 2014).

A composição química da cachaça está diretamente relacionada às condições empregadas durante sua produção, principalmente nas etapas de fermentação e destilação. Compostos como álcoois, ésteres, aldeídos e ácidos contribuem para o aroma e o sabor da bebida, enquanto substâncias presentes em concentrações inadequadas podem comprometer sua qualidade (Moreira et al., 2012; Silva et al., 2020). Entre os contaminantes que exigem atenção encontra-se o cobre, cuja presença está relacionada principalmente ao uso de alambiques fabricados com esse metal, tradicionalmente empregados na produção artesanal.

Durante a destilação, o cobre desempenha uma função importante ao favorecer a remoção de compostos sulfurados indesejáveis, melhorando o aroma e o sabor da cachaça. Após essa etapa, entretanto, sua permanência no produto final deixa de apresentar benefício e, em concentrações elevadas, pode prejudicar a saúde do consumidor e dificultar a comercialização da bebida. A legislação brasileira estabelece o limite máximo de 5 mg L^{-1}, enquanto, para exportações à União Europeia, recomenda-se que o teor não ultrapasse 1 mg L^{-1} (Brasil, 2005). Dessa forma, a redução do cobre ao menor nível possível é importante tanto para a segurança do produto quanto para sua entrada em mercados mais exigentes, sendo necessário considerar não apenas a eficiência da remoção, mas também o custo, o tempo de tratamento, a disponibilidade e a facilidade de utilização do material empregado.

Nesse contexto, a adsorção apresenta-se como uma alternativa para reduzir a concentração de cobre na cachaça por meio do contato com materiais sólidos capazes de reter o metal. No presente estudo, foram avaliados o carvão ativado e a casca de ovo nas granulometrias de 42 e 80 mesh, buscando comparar a capacidade de remoção de cada

ISSN 2317-1316

adsorvente e verificar a possibilidade de utilização de um resíduo de baixo custo e fácil obtenção. O comportamento do processo também foi analisado por meio de modelos de equilíbrio e cinética, permitindo compreender os mecanismos envolvidos na adsorção e identificar as condições mais favoráveis para a descontaminação da bebida.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consistiu em um estudo experimental para avaliar a remoção de cobre em cachaça por adsorção. Foram utilizados carvão ativado e casca de ovo nas granulometrias de 42 e 80 mesh. Os reagentes empregados foram tiossulfato de sódio, amido, dicromato de potássio, iodeto de potássio, ácido clorídrico, sulfato de cobre penta-hidratado e etanol, todos de grau analítico.

A solução de tiossulfato de sódio com concentração aproximada de 0,1 mol L^{-1} foi preparada pela dissolução de 25 g do sal em 1 L de água. A solução foi fervida durante 5 minutos, armazenada em frasco escuro e posteriormente padronizada com dicromato de potássio. Após a padronização, foi realizada sua diluição para uma concentração próxima de 0,01 mol L^{-1}. Também foram preparadas uma solução indicadora de amido a 1%, uma solução de sulfato de cobre penta-hidratado a 19,6 g L^{-1} e uma solução de etanol a 40% em volume, empregada na validação inicial do método analítico.

Nos ensaios de adsorção, foram utilizados 100 mL de cachaça, aos quais foram adicionadas quantidades previamente definidas de sulfato de cobre penta-hidratado, conforme a concentração inicial estabelecida em cada experimento. A mistura permaneceu sob agitação magnética durante 20 minutos, a fim de assegurar a completa dissolução e distribuição do cobre na bebida. Em seguida, foram adicionados 2 g de carvão ativado, casca de ovo 42 mesh ou casca de ovo 80 mesh.

As amostras foram mantidas sob agitação e temperatura controlada de 25 ou 30 °C, conforme a condição experimental avaliada. Nos ensaios comparativos, o tempo de contato entre a cachaça e o adsorvente foi de 30 minutos. Para os estudos de equilíbrio, foram utilizadas diferentes concentrações iniciais de cobre, enquanto, nos estudos cinéticos, o tempo de contato foi variado para acompanhar a remoção do metal ao longo do processo. Ao término de cada ensaio, as amostras foram filtradas para separar a fase líquida do material adsorvente.

ISSN 2317-1316

A concentração residual de cobre foi determinada por titulação iodométrica com solução padronizada de tiossulfato de sódio. Em um Erlenmeyer de 250 mL, foram adicionados 1 g de iodeto de potássio, 1mL de ácido clorídrico, 1 mL da solução de sulfato de cobre penta-hidratado e 100 mL da amostra filtrada. O recipiente foi fechado e mantido ao abrigo da luz durante 5 minutos. Em seguida, a solução foi titulada com tiossulfato de sódio 0,01 mol L^{-1} sob agitação magnética contínua até atingir coloração amarelo-pálida.

Após essa etapa, foram adicionados 3 mL da solução indicadora de amido, ocasionando o aparecimento de uma coloração azul-escura. A titulação prosseguiu até o desaparecimento dessa cor e o retorno da solução ao aspecto translúcido característico da cachaça, indicando o ponto final da reação. A agitação magnética foi mantida em todas as titulações para proporcionar maior homogeneização da solução e permitir uma identificação mais precisa da mudança de cor.

A concentração residual de cobre nas amostras foi determinada a partir do volume de solução de tiossulfato de sódio consumido durante a titulação, conforme a Equação (1):

$$C_{Cu-amostra} = \frac{V_g \cdot M' \cdot 63{,}5 \cdot 1000 - T \cdot V_f}{V_a'} \quad (1)$$

Em que $C_{Cu-amostra}$ representa a concentração de cobre na amostra, em mg L^{-1}; V_g corresponde ao volume de tiossulfato de sódio consumido na titulação, em L; M' é a concentração efetiva da solução de tiossulfato de sódio, em mol L^{-1}; T corresponde à concentração média determinada para o padrão de cobre, em mg L^{-1}; V_f é o volume da solução de cobre utilizada na fortificação da amostra, em L; e V_a' representa o volume da amostra de cachaça submetida à análise, em L.

A quantidade de cobre adsorvida por unidade de massa do adsorvente no equilíbrio q_e foi determinada pela Equação (2):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (2)$$

Em que C_0 e C_e representam, respectivamente, as concentrações inicial e de equilíbrio do cobre, em mg L^{-1}; V corresponde ao volume da solução, em L; e m à massa do adsorvente, em g. A eficiência de remoção foi calculada pela Equação (3):

$$Remoção(\%) = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \cdot 100 \quad (3)$$

ISSN 2317-1316

O coeficiente de distribuição (K_D), utilizado para avaliar a afinidade do adsorvente pelo cobre, foi calculado conforme a Equação (4):

$$K_D = \frac{q_e}{C_e} \tag{4}$$

Os dados de equilíbrio foram avaliados pelos modelos de Freundlich, Langmuir e Dubinin–Radushkevich. Entre os modelos empregados, o modelo de Freundlich foi analisado conforme as Equações (5) e (6):

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \tag{5}$$

Em que K_F está relacionado à capacidade de adsorção do material e n representa um parâmetro associado à intensidade da adsorção.

A forma linearizada do modelo, utilizada para obtenção dos parâmetros K_F e n, é apresentada na Equação (6):

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \tag{6}$$

Os dados cinéticos foram avaliados pelos modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem, Weber–Morris e Boyd. Entre os modelos cinéticos empregados, o modelo de pseudo-segunda ordem foi analisado em sua forma linearizada, conforme a Equação (7):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \tag{7}$$

Em que q_t representa a quantidade de cobre adsorvida no tempo t, em mg g^{-1}; q_e corresponde à quantidade adsorvida no equilíbrio, em mg g^{-1}; e k_2 é a constante cinética de pseudo-segunda ordem.

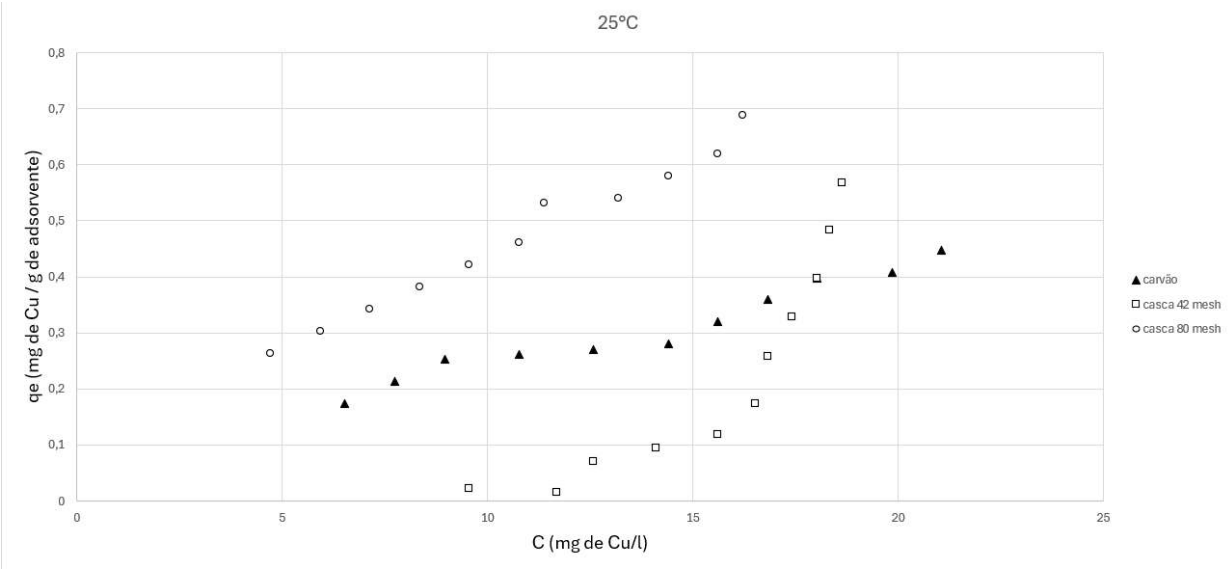
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do processo de adsorção demonstrou comportamentos distintos entre a casca de ovo nas granulometrias de 42 e 80 mesh e o carvão ativado. De modo geral, a casca de ovo 80 mesh apresentou o melhor desempenho na remoção do cobre, com maiores valores de quantidade adsorvida por unidade de massa (q_e), coeficiente de distribuição (K_D) e eficiência de remoção. O carvão ativado apresentou comportamento intermediário, enquanto a casca de ovo 42 mesh demonstrou menor eficiência, principalmente nas menores concentrações

ISSN 2317-1316

avaliadas. Conforme apresentado na Figura 1, os valores de q_e aumentaram com a concentração de equilíbrio (C_e), embora em proporções diferentes para cada adsorvente. Esse comportamento sugere influência da granulometria sobre o processo, uma vez que partículas menores podem favorecer o contato entre o adsorvente e a fase líquida.

Figura 1: Quantidade de cobre adsorvida em função da concentração de equilíbrio.

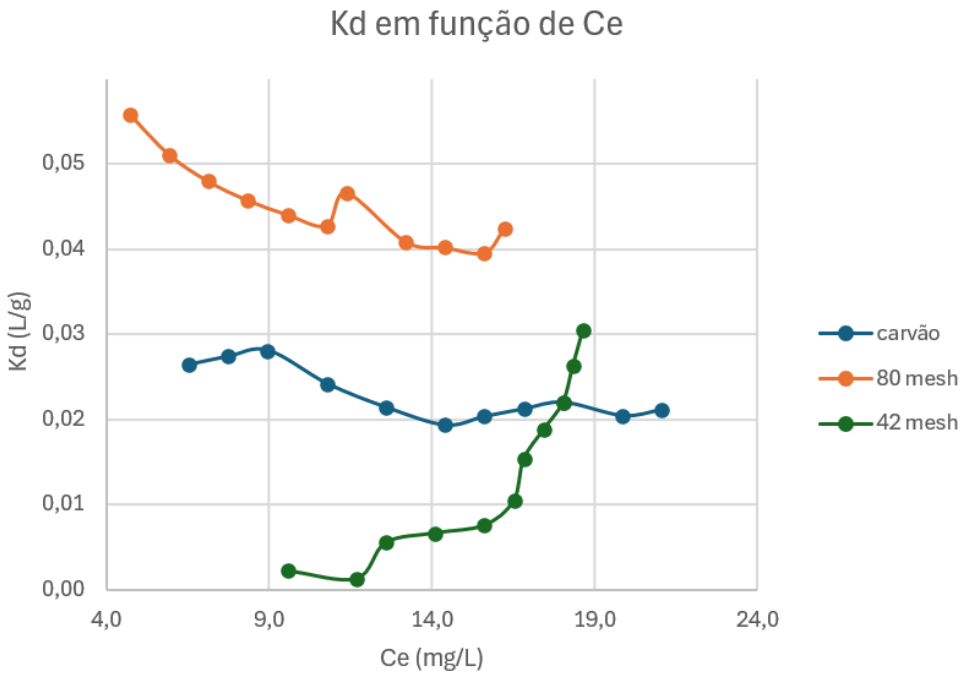


A análise do coeficiente de distribuição permitiu avaliar a relação entre a quantidade de cobre retida pelo material e aquela que permaneceu em solução no equilíbrio. Para a casca de ovo 42 mesh, observou-se aumento de K_D com a elevação de C_e, indicando maior retenção proporcional nas concentrações mais elevadas.

Em contrapartida, a casca de ovo 80 mesh apresentou os maiores valores de K_D nas menores concentrações, com tendência geral de redução à medida que C_e aumentou. O carvão ativado apresentou pequena elevação inicial, seguida de redução nas maiores concentrações. Apesar dessas diferenças, a casca de ovo 80 mesh manteve os maiores valores de K_D em grande parte das condições avaliadas, enquanto a casca de ovo 42 mesh se aproximou ou superou o carvão ativado apenas nas concentrações mais elevadas, conforme mostrado na Figura 2.

ISSN 2317-1316

Figura 2: Coeficiente de distribuição (K_D) em função da concentração de equilíbrio (C_e).

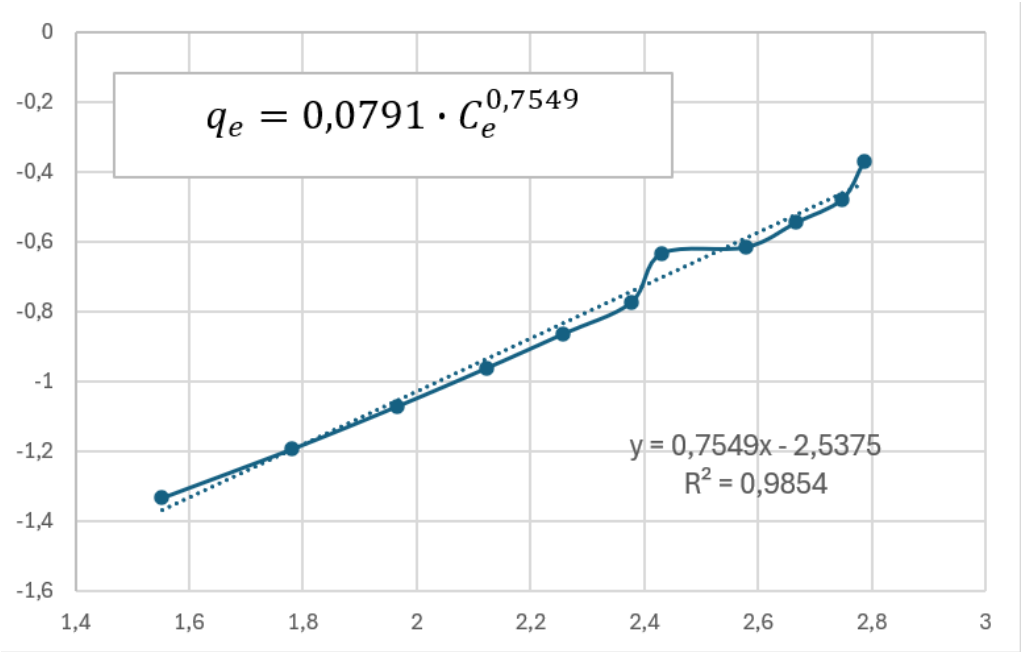


Os dados de equilíbrio foram avaliados pelos modelos de Freundlich, Langmuir e Dubinin–Radushkevich. Entre eles, Freundlich apresentou o melhor ajuste, principalmente para a casca de ovo 80 mesh, com $R^2 = 0{,}9854$, seguida pelo carvão ativado, com $R^2 = 0{,}9438$, e pela casca de ovo 42 mesh, com $R^2 = 0{,}9050$. Para a casca de 80 mesh foram obtidos $K_F = 0{,}0791$ e $n = 1{,}32$, enquanto o carvão ativado apresentou $K_F = 0{,}0466$ e $n = 1{,}39$. Os valores de n superiores à unidade para esses dois materiais indicaram comportamento mais favorável de adsorção.

Os modelos de Langmuir e Dubinin–Radushkevich apresentaram ajustes inferiores ao de Freundlich; o modelo de Dubinin–Radushkevich, entretanto, indicou valores de energia média compatíveis com predominância de adsorção física nas condições avaliadas. O ajuste da casca de ovo 80 mesh, apresentado na Figura 3, reforça a maior adequação ao modelo de Freundlich e indica comportamento compatível com uma superfície heterogênea, com diferentes tipos de sítios de adsorção.

ISSN 2317-1316

Figura 3: Ajuste linearizado do modelo de Freundlich para a casca de ovo 80 mesh.

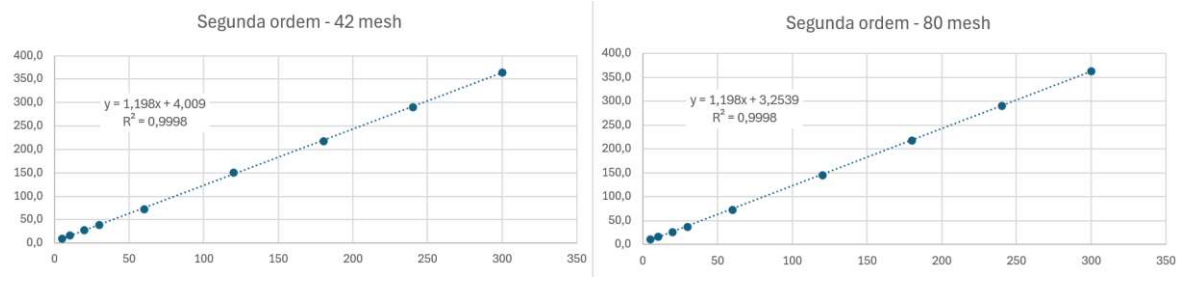


A cinética foi avaliada pelos modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. Embora a pseudo-primeira ordem tenha apresentado elevados coeficientes de determinação, os valores calculados de q_e, de 0,4741 mg g^{-1} para 42 mesh e 0,6701 mg g^{-1} para 80 mesh, ficaram afastados do valor experimental de 0,8245 mg g^{-1}. Para a pseudo-segunda ordem, o valor calculado foi de 0,8347 mg g^{-1} para ambas as granulometrias, apresentando maior proximidade com o resultado experimental, além de $R^2 = 0{,}9998$, conforme a Figura 4.

Os modelos de Weber–Morris e Boyd também foram avaliados durante o tratamento cinético, porém foram utilizados principalmente como análises complementares do mecanismo de transporte, indicando participação da difusão intrapartícula e do transporte externo. Assim, a pseudo-segunda ordem apresentou a melhor adequação para descrever a cinética observada.

ISSN 2317-1316

Figura 4: Ajuste do modelo de pseudo-segunda ordem para as cascas de ovo de 42 e 80 mesh.



4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a adsorção foi eficiente para a remoção de cobre da cachaça, sendo a casca de ovo 80 mesh o material que apresentou o melhor desempenho entre os adsorventes avaliados. O equilíbrio foi melhor descrito pelo modelo de Freundlich, indicando comportamento compatível com uma superfície heterogênea, enquanto a análise de Dubinin–Radushkevich apontou predominância de adsorção física. Para a cinética, o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou a melhor concordância com os dados experimentais, e as análises complementares indicaram participação da difusão intrapartícula e do transporte externo. Dessa forma, a casca de ovo demonstrou potencial como alternativa de baixo custo para a redução do teor de cobre na bebida. Como continuidade do estudo, recomenda-se avaliar outras condições de operação, a possibilidade de reutilização do adsorvente e a aplicação do processo em maior escala. Agradece-se à Universidade Santa Cecília e ao Professor Doutor Vitor da Silva Rosa pelo suporte fornecido durante o desenvolvimento da pesquisa.

5 DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Declaração de Uso de IA: Durante a elaboração deste trabalho, utilizou-se a ferramenta ChatGPT, da OpenAI, para revisão gramatical e auxílio na tradução do texto para a língua inglesa. O conteúdo gerado foi revisado, editado e validado pelos autores, que assumem total responsabilidade pelo texto final.

ISSN 2317-1316

6 REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Aprova o Regulamento Técnico para Fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para Aguardente de Cana e para Cachaça. Instrução Normativa nº 13, de 29 de junho de 2005. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 jun. 2005a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Decreto nº 6.871, de 4 de junho de 2009. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 21 jun. 2009.

COUTINHO, E. P. et al. Boas práticas de fabricação de cachaça de alambique: visão técnica versus empresarial. Journal of Health Sciences, v. 14, n. 3, p. 165-170, 2012. Disponível em: https://revista.pgsskroton.com/index.php/JHealthSci/article/view/930/894. Acesso em: 25 março de 2026.

MOREIRA, R. F. A.; NETO, C. C.; MARIA, C. A. B. A fração volátil das aguardentes de cana produzidas no Brasil. Química Nova, v. 35, n. 9, p. 1819-1826, 2012.

SAES, M. S. M.; KOLYA, T. A institucionalização da cachaça no Brasil: construção de mercados e coordenação da cadeia produtiva. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 52, n. 1, p. 151–168, 2014.

SILVA, A. P. et al. Chemical composition of sugar cane spirit produced from different distillation methods. Brazilian Journal of Food Technology, v. 23, e2018308, 2020.