

UTILIZAÇÃO DE CASCA DE CAFÉ COMO ADSORVENTE DO CORANTE AZUL DE METILENO

Jarod Jonahtan Costa Batista¹; Ana Paula Silva Capuci¹

¹Universidade de Uberaba - Uniube, Brasil

Autor Correspondente: anap.silva@uniube.br

RESUMO

O presente estudo avaliou o potencial da casca de café *in natura* e do carvão ativado produzido a partir desse resíduo agroindustrial como adsorventes no tratamento de água contaminada com azul de metileno. O teor de umidade da biomassa foi determinado, obtendo-se média de 12,97%. A biomassa foi submetida à calcinação em mufla nas temperaturas de 200 a 600°C, sendo 400°C identificada como a condição mais favorável, por promover adequada remoção de matéria volátil com rendimento mássico viável. As amostras de carvão ativado e de casca *in natura* foram submetidas a tratamentos químicos com HCl (0,1 mol·L⁻¹) e NaOH (0,1 mol·L⁻¹) em diferentes tempos de contato. Os ensaios de adsorção em batelada utilizaram solução aquosa de azul de metileno (0,05 mg·mL⁻¹), monitorada por espectrofotometria na região do visível. O carvão ativado apresentou desempenho superior, com remoções médias de 90,25% e 86,95% após tratamentos com NaOH e HCl, respectivamente. A casca *in natura* alcançou remoções de 44,09% (NaOH) e 67,45% (HCl). Conclui-se que a ativação térmica combinada ao tratamento químico aumenta a porosidade e os sítios ativos do material, tornando o carvão obtido da casca de café um adsorvente promissor para o tratamento de efluentes contendo corantes.

Palavras-chave: adsorção; tratamento de efluentes; casca de café; carvão ativado; azul de metileno; resíduo agroindustrial.

ABSTRACT

This study evaluated the potential of raw coffee husk and activated carbon produced from this agroindustrial residue as adsorbents for the treatment of water contaminated with methylene blue. The moisture content of the biomass was determined, yielding a mean value of 12.97%. The biomass was subjected to

calcination in a muffle furnace at temperatures ranging from 200 to 600°C, with 400°C identified as the most favorable condition, as it promoted adequate removal of volatile matter while maintaining a viable mass yield. Activated carbon samples and raw coffee husk were subjected to chemical treatments with HCl (0.1 mol·L⁻¹) and NaOH (0.1 mol·L⁻¹) at different contact times. Batch adsorption assays were conducted using an aqueous methylene blue solution (0.05 mg·mL⁻¹), monitored by visible-range spectrophotometry. Activated carbon demonstrated superior performance, achieving mean removal rates of 90.25% and 86.95% following NaOH and HCl treatments, respectively. Raw coffee husk reached removal rates of 44.09% (NaOH) and 67.45% (HCl). It is concluded that thermal activation combined with chemical treatment increases the porosity and active sites of the material, making coffee husk-derived activated carbon a promising adsorbent for the treatment of dye-containing effluents.

Keywords: adsorption; wastewater treatment; coffee husk; activated carbon; methylene blue; agro-industrial residue.

1 INTRODUÇÃO

O café foi consumido pela humanidade ao longo de séculos, integrando hábitos alimentares e práticas culturais em diferentes regiões do mundo. Embora sua origem seja muitas vezes associada à Península Arábica, registros históricos indicaram que o cultivo do cafeeiro já ocorria em outras localidades, sendo a região africana apontada como provável berço dessa cultura (Pereira, 2008; Araújo; Silva; Rocha, 2023).

A introdução do café no Brasil ocorreu em meados do século XVII, a partir de mudas provenientes da Guiana Francesa. A combinação favorável de clima e condições edafoclimáticas contribuiu para a rápida expansão da cafeicultura no território brasileiro, com destaque para o estado de Minas Gerais, que se consolidou como um dos principais produtores nacionais (Araújo; Silva; Rocha, 2023). No cenário contemporâneo, o Brasil passou a responder por parcela significativa da produção e exportação mundial de café, figurando também entre os maiores consumidores desse produto (Associação Brasileira da Indústria de Café, 2021).

O processamento do café, entretanto, gera grandes volumes de resíduos sólidos, dentre os quais se destaca a casca, também denominada palha de café, constituída por epicarpo, mesocarpo e endocarpo. A razão aproximada de geração de casca em relação ao grão beneficiado é da ordem de 1:1, o que corresponde a toneladas de material com baixo valor agregado, frequentemente descartado de forma inadequada (Silva *et al.*, 2020; Silva; Mahmoud; Mendonça, 2023). Esse resíduo apresenta composição lignocelulósica e pode ser aproveitado em diferentes aplicações, como componente de substratos para mudas ou precursor de materiais carbonáceos.

Do ponto de vista ambiental, a valorização da casca de café está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (Organização das Nações Unidas, 2015), em especial o ODS 12, que trata de consumo e produção responsáveis, e o ODS 6, que aborda água potável e saneamento. A utilização desse resíduo como adsorvente em processos de tratamento de efluentes contribui simultaneamente para a gestão adequada de resíduos agroindustriais e para a mitigação da poluição hídrica, favorecendo a adoção de tecnologias mais acessíveis e sustentáveis.

A adsorção em carvão ativado é amplamente aplicada na remoção de matéria orgânica, corantes e outros poluentes em sistemas de tratamento de efluentes. Carvões ativados de origem vegetal apresentam elevada área superficial específica, porosidade desenvolvida e grupos funcionais que favorecem a interação com espécies orgânicas e inorgânicas (Santos *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2009; Schultz, 2016). Diversos estudos relataram o potencial de biomassas residuais, como palha de cana-de-açúcar, para a produção de carvões ativados com desempenho comparável ou superior ao de materiais comerciais (Alves *et al.*, 2020), reforçando a relevância da pesquisa voltada à valorização de resíduos agroindustriais.

Entre os corantes utilizados como contaminantes modelo em estudos de adsorção, o azul de metileno se destacou pela forte afinidade com superfícies sólidas e pela facilidade de monitoramento por espectrofotometria, sendo frequentemente empregado na avaliação da capacidade adsorptiva de novos materiais (Ramos *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2015).

Diante desse contexto, a casca de café passou a ser vista como um recurso potencialmente valioso para a produção de carvão ativado e para aplicação direta como biomassa adsorvente em efluentes contendo corantes. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a utilização da casca de café *in natura* e do carvão ativado produzido a partir desse resíduo agroindustrial como adsorventes para remoção do corante azul de metileno em meio aquoso.

Como objetivos específicos, estabeleceram-se:

- (i) determinar o teor de umidade da casca de café *in natura*;
- (ii) avaliar o efeito da temperatura de calcinação da casca de café (200 a 600 °C) sobre a perda de massa e o teor de carbono orgânico;
- (iii) produzir carvão ativado a partir da casca de café na condição térmica selecionada e submetê-lo a tratamentos químicos ácido e básico;
- (iv) investigar a capacidade de adsorção do corante azul de metileno pela casca de café *in natura* e pelo carvão ativado, comparando-se as diferentes condições de tratamento químico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O processamento dos frutos de café pode ser realizado pelas vias seca ou úmida. Na via seca, os grãos são desidratados inteiros, enquanto na via úmida ocorre o descascamento prévio, com remoção do epicarpo (casca externa) e, posteriormente, do mesocarpo, também denominado polpa ou mucilagem (Silva; Mahmoud; Mendonça, 2023).

O beneficiamento do café resulta na geração de diferentes subprodutos, entre os quais se destacou a casca, conhecida como palha de café. Esse material corresponde às partes do fruto que não são aproveitadas durante o processamento, como epicarpo, mesocarpo e endocarpo (pergaminho) (Silva; Mahmoud; Mendonça, 2023). De acordo com Silva *et al.* (2020), a quantidade de palha gerada é próxima de 1:1 em relação ao café beneficiado, o que implica produção significativa de resíduo com potencial de reaproveitamento, seja como componente de substratos para mudas florestais, seja como matéria-prima para obtenção de materiais adsorventes.

O carvão ativado é um material carbonáceo que, após tratamento adequado, apresenta elevada porosidade interna, grande área superficial e grupos funcionais que conferem alta capacidade de adsorção de impurezas ou moléculas presentes em soluções líquidas e gasosas. Sua produção pode ocorrer por ativação física ou química. Na ativação física, o material previamente carbonizado é gaseificado por meio de oxidação em temperaturas elevadas. Na ativação química, aplicam-se agentes ativantes ao precursor, seguido de etapas de carbonização e pirólise (Santos *et al.*, 2015).

Em escala industrial, o carvão ativado é amplamente utilizado como adsorvente em processos de tratamento de efluentes, incluindo a remoção de corantes orgânicos. Entre os corantes empregados em testes de adsorção, o azul de metileno se destaca por apresentar elevada interação com sólidos, favorecendo a avaliação comparativa de diferentes materiais adsorventes (Santos *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2009). Segundo Ramos *et al.* (2009), o carvão ativado é particularmente eficiente no controle da concentração de matéria orgânica em efluentes, com ênfase em espécies responsáveis pela coloração.

Biomassas residuais, quando submetidas a técnicas adequadas de conversão térmica, podem originar carvões com elevada área superficial, porosidade desenvolvida, boa estabilidade mecânica e química, além de reatividade controlada, o que amplia sua aplicação em diferentes processos industriais (Schultz, 2016). Nesse contexto, a obtenção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais representa alternativa estratégica para a despoluição ambiental, tanto em sistemas de tratamento de efluentes quanto em processos de purificação de ar.

Estudos recentes demonstraram que o carvão ativado obtido de resíduos agrícolas, como a palha de cana-de-açúcar, pode apresentar capacidade de adsorção superior à de materiais comerciais, evidenciando o potencial da valorização de biomassas na produção de adsorventes de alto desempenho

(Alves *et al.*, 2020). Resultados semelhantes foram observados para resíduos de café, indicando que a casca pode atuar como precursor promissor para produção de carvão ativado destinado à remoção de poluentes orgânicos, incluindo corantes em meio aquoso (Santos *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2009).

3 METODOLOGIA

Nesta seção, são descritos os materiais e os procedimentos adotados para determinação do teor de umidade e de cinzas da casca de café, avaliação da influência da temperatura na eficiência da calcinação e caracterização da composição de carbono orgânico em diferentes condições térmicas, bem como os ensaios de adsorção com azul de metileno. O texto é apresentado em tempo verbal no passado impessoal, de modo a permitir a reprodução dos ensaios.

A casca de café utilizada neste estudo foi fornecida pela empresa Puro Café, situada em Uberaba-MG, variedade Catuaí Vermelho. A amostra foi homogeneizada e fracionada em quarteador (Figura 1). As frações foram submetidas à secagem preliminar em estufa a 105 °C por 20 minutos, visando à remoção de umidade superficial. Após resfriamento em dessecador, as amostras foram pesadas em balança analítica.

Figura 1 - Quarteador



Fonte: Acervo dos autores (2025).

A determinação da umidade foi realizada em balança determinadora de umidade Bel, modelo i-thermo G163L (Figura 2). Foram analisadas oito amostras, contendo aproximadamente 4,5 g de casca, submetidas à secagem a 105 °C até massa constante. A umidade foi calculada a partir da diferença entre as massas inicial e final, expressa em percentual.

Figura 2 – Balança Determinadora de Umidade Bel i-thermo G163L



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Em seguida, as amostras previamente secas foram acomodadas em cadinhos e submetidas à calcinação em forno mufla Jung, modelo LF 06 12 (Figura 3), por 60 minutos, às temperaturas de 200, 300, 400, 500 e 600°C (Figura 4).

Figura 3 – Mufla Jung Modelo LF 06 12



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Figura 4 – Amostras referente a curva de calcinação



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Após o resfriamento em dessecador, os conjuntos cadinho + amostra foram pesados. A perda de massa (PM) foi calculada pela Equação (1), utilizando as massas inicial (m_i), final (m_f) e a tara do cadinho (TC), e foi empregada para comparar o efeito da temperatura sobre o rendimento do material calcinado. Na Figura 5, a seguir, o resultado da calcinação é mostrado.

$$PM = \frac{(m_i - m_f)}{(m_i - TC)} \quad (1)$$

Figura 5 – Resultado calcinação a 400 °C



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Após a definição da temperatura de 400°C como condição operacional mais adequada no contexto estudado, foram realizados ensaios adicionais de calcinação para obtenção de maior quantidade de material calcinado (Figura 6). A partir dessas amostras, foi determinada a fração de carbono orgânico total, volatilizado e calcinado em função da temperatura, permitindo a avaliação da estabilidade térmica da biomassa.

Figura 6 – Amostras antes e após a calcinação



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Foram realizados tratamentos químicos ácido (HCl $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) e básico (NaOH $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) tanto para o carvão obtido quanto para a casca de café *in natura*. No caso do carvão, foram tratadas amostras de 5 g para cada tempo de contato (5, 15 e 20 h), totalizando 15 g em NaOH e 15 g em HCl. Para a casca *in natura*, foram tratadas amostras de 20 g para cada tempo, totalizando 60 g em NaOH e 60 g em HCl. Após o tempo de contato, os sólidos foram separados, lavados, filtrados e secos, sendo posteriormente reservados para os ensaios de adsorção (Figura 7).

Figura 7 – Diferentes amostras de casca tratada com NaOH



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Os testes de adsorção foram conduzidos utilizando o corante azul de metileno como contaminante modelo, em solução aquosa com concentração de $0,05 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$. Alíquotas de 20 mL da solução foram colocadas em contato com a casca de café *in natura* e com o carvão ativado, nas diferentes condições de tratamento químico. A solução de $0,05 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ apresentou absorvância inicial de referência ($\text{ABS}_{\text{inicial}} = 0,483$) para o carvão e $\text{ABS}_{\text{inicial}} = 0,472$ para a casca *in natura*. Previamente aos ensaios, foi construída uma curva de calibração em balões de 50 mL, a partir de padrões de azul de metileno em diferentes concentrações.

Após o tempo de contato entre adsorvente e solução, o sobrenadante foi separado em duas frações: uma alíquota destinada à leitura direta da absorvância após o teste e outra alíquota filtrada, com o objetivo de remover partículas em suspensão de menor densidade. Em ambas as situações, a absorvância foi medida em espectrofotômetro Kasuaki, modelo SP-222 (Figura 8). As leituras obtidas antes (ABS) e após a filtração (ABS_{PF}) foram utilizadas para o cálculo da remoção percentual do corante, considerando ABS_{PF} como indicador direto da concentração residual na solução.

Figura 8 – Espectrofotômetro kasuaki Modelo: Sp-222



Fonte: Acervo dos autores (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente seção apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios experimentais, desde a caracterização da biomassa até a avaliação do desempenho adsorptivo do carvão ativado e da casca de café *in natura*.

4.1 Umidade da Casca de Café

A análise de umidade das cascas de café *in natura* resultou em valores entre 11,74% e 13,90%, com média de 12,97% (Tabela 1). Esses valores se

mostraram consistentes com os relatados por Vieira (2015), que indicou teores de umidade na faixa de 10% a 13%, dependendo do processo de secagem e das condições ambientais. Esse parâmetro é relevante, pois se relaciona diretamente com o tempo de armazenamento e com a suscetibilidade do resíduo à contaminação microbiológica. Adicionalmente, foi possível observar a redução do volume e a alteração do aspecto visual da casca após a secagem (Figuras 9 e 10), evidenciando a remoção de água livre e a compactação parcial do material.

Tabela 1 – Resultados da determinação de umidade das cascas de café *in natura*

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Umidade (%)
1	4,90	4,29	12,37
2	4,77	4,11	13,76
3	4,55	3,98	12,49
4	4,52	3,99	11,74
5	4,63	4,00	13,48
6	4,45	3,89	12,48
7	4,40	3,81	13,52
8	4,52	3,90	13,90
Média	--	--	12,97

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Figura 9 – Casca de café úmida antes do processo de secagem



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Figura 10 – Casca de café após a secagem: redução de umidade e mudança de aspecto visual



Fonte: Acervo dos autores (2025).

4.2 Efeito da Calcinação

Os resultados dos ensaios de calcinação encontram-se na Tabela 2. Observou-se que a perda de massa aumentou com a elevação da temperatura, refletindo a remoção progressiva de umidade residual, compostos voláteis e frações orgânicas termicamente menos estáveis. Em temperaturas mais baixas (200 °C), a perda de massa esteve associada predominantemente à evaporação de água adsorvida e à decomposição inicial de componentes voláteis. À medida que a temperatura foi elevada para 300, 400, 500 e 600°C, ocorreu a degradação mais intensa de constituintes orgânicos, como celulose, hemicelulose e parte da lignina, resultando em maiores valores de perda de massa.

Tabela 2 – Resultados obtidos nos experimentos de calcinação da casca de café

Temperatura (°C)	Tara cadinho (g)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)
200	31,93	37,90	36,31	26,65
300	33,34	40,96	36,63	56,84
400	34,13	41,39	35,94	75,12
500	30,68	37,14	31,89	81,27
600	33,28	40,48	34,17	87,61

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

A condição de 400°C apresentou combinação favorável entre perda de massa e rendimento de material sólido, fornecendo carvão com teor de carbono

ainda significativo e quantidade adequada para os ensaios subsequentes. Em temperaturas superiores, embora a perda de massa tenha sido maior, o teor de carbono orgânico remanescente reduziu-se de forma acentuada, conforme discutido a seguir.

4.3 Teores de Carbono Orgânico

A Tabela 3 apresenta os teores de carbono orgânico total, volatilizado e calcinado em função da temperatura. Verificou-se que o teor de carbono orgânico diminuiu de forma significativa acima de 400°C, atingindo valores inferiores a 20% a 500°C. Essa tendência foi atribuída à decomposição térmica de celulose e hemicelulose e à degradação progressiva de frações lignínicas, que compõem a estrutura vegetal da casca de café.

Tabela 3 – Resultados da determinação de carbono orgânico, volatilizado e calcinado da casca de café

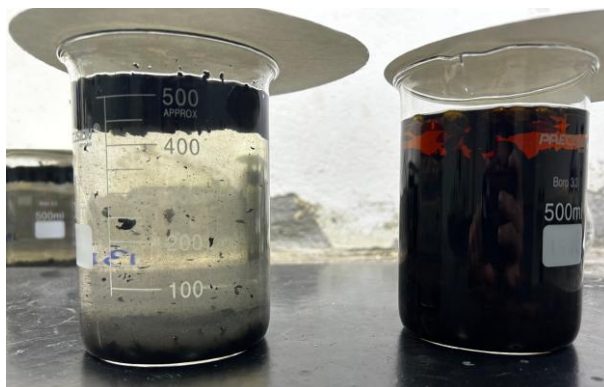
Temperatura (°C)	Carbono Orgânico (%)	Volatilizado (%)	Calcinado (%)
100	31,90	0,00	0,00
200	36,69	26,65	73,35
300	41,63	56,84	43,16
400	28,25	75,12	24,88
500	14,02	81,27	18,73
600	10,21	87,61	12,39

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

4.4 Tratamento Químico das amostras

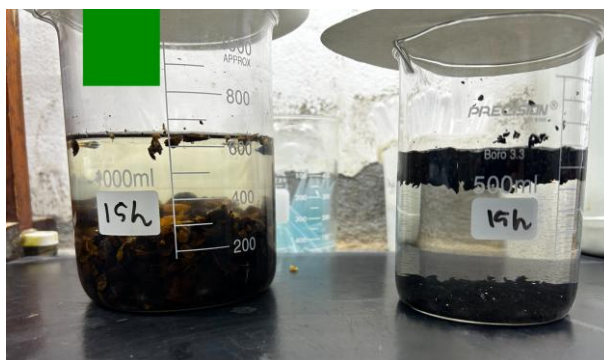
Após a definição da temperatura de 400°C, foram realizadas as etapas de produção do carvão e de tratamento químico. Durante o repouso nas soluções de NaOH e HCl, observou-se que a casca *in natura* apresentou maior densidade aparente, formando duas fases bem definidas (sólido sedimentado e fase líquida), além de alteração da coloração da solução no tratamento com NaOH (Figuras 11, 12 e 13). Para o carvão ativado, foi observada a formação de três fases: uma fração menos densa no sobrenadante, uma fase dispersa intermediária e uma fração mais densa depositada no fundo dos recipientes, evidenciando heterogeneidade na distribuição de partículas e possíveis modificações de superfície.

Figura 11 – Amostras submetida a tratamento químico com NaOH antes do teste de adsorção



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Figura 12 – Amostras submetida a tratamento químico com HCl antes do teste de adsorção



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Figura 13 – Filtrado obtido após tratamento com NaOH



Fonte: Acervo dos autores (2025).

4.5 Desempenho do Carvão Ativado

A partir dos dados de calibração apresentados na Tabela 4 e na Figura 14, foi ajustada a equação da reta (Equação 2), utilizada para estimar as concentrações de azul de metileno a partir das leituras de absorvância:

$$Y = 8,2429X - 0,0069 \quad (2)$$

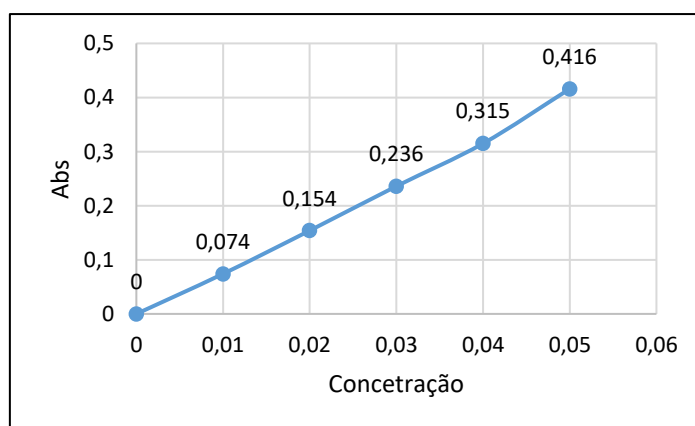
em que Y corresponde à absorvância e X à concentração de azul de metileno ($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$). O coeficiente de correlação ($R^2 = 0,9978$) indicou bom ajuste do modelo linear aos dados experimentais.

Tabela 4 – Leitura das diluições dos balões para construção da curva de calibração

Concentração (mg/mL)	Absorvância
0	0,000
0,01	0,074
0,02	0,154
0,03	0,236
0,04	0,315
0,05	0,416
Coef. Ang.	8,24286
Coef. Lin.	-0,00690
R^2	0,99780

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

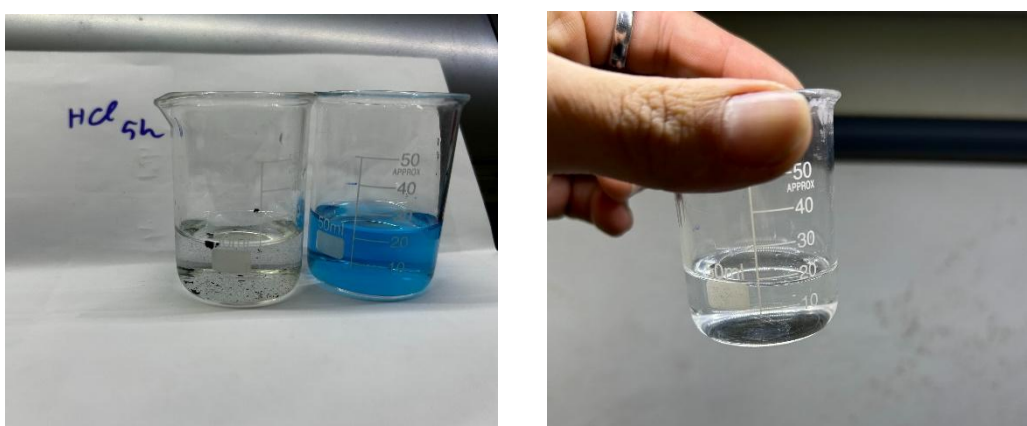
Figura 14 – Variação da absorvância pela concentração



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Considerando-se ABS_PF como indicador da concentração residual após filtração, os melhores resultados para o carvão ativado foram obtidos para o tratamento básico com NaOH por 15 h, com ABS_PF = 0,009 e remoção aproximada de 93,27% (Tabela 5). Para o tratamento ácido com HCl, remoções de 92,45% e 90,80% foram observados para 5 h e 15 h de contato, respectivamente (Tabela 6 e Figura 15). Esses valores superaram de maneira clara o desempenho do carvão sem tratamento químico, cuja remoção foi de 58,65% (Tabela 7).

Figura 15 – Comparação do filtrado com amostra contaminada



Fonte: Acervo dos autores (2025).

Tabela 5 – Carvão ativado tratado com NaOH: absorbâncias e remoção percentual

Tratamento	Massa (g)	ABS	ABS_PF	Remoção (ABS_PF) %
NaOH 5h	1,0022	0,043	0,014	89,15
NaOH 15h	1,0033	0,057	0,009	93,27
NaOH 20h	1,0033	0,044	0,015	88,33
Média	-	-	-	90,25

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Tabela 6 – Carvão ativado tratado com HCl: absorbâncias antes e após filtração e remoção percentual

Tratamento	Massa (g)	ABS	ABS_PF	Remoção (ABS_PF) %
HCl 5h	1,0085	0,046	0,010	92,45
HCl 15h	1,0022	0,045	0,012	90,80
HCl 20h	1,0028	0,065	0,028	77,61
Média	-	-	-	86,95

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Tabela 7 – Carvão ativado sem tratamento: absorbância e remoção percentual

Condição	Massa (g)	ABS	ABS_PF	Remoção (ABS_PF) %
Sem tratamento	1,0045	0,178	0,051	58,65

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Os resultados sugeriram que os tratamentos químicos contribuíram para o aumento da acessibilidade aos sítios ativos e para a remoção de impurezas superficiais, favorecendo a adsorção do corante. Em particular, o tratamento básico com NaOH por 15 h apresentou a melhor combinação entre tempo de contato e eficiência de remoção.

4.6 Desempenho da Casca de Café *in Natura*

Para a casca *in natura*, o melhor desempenho foi observado na amostra sem tratamento, com ABS_PF = 0,030 e remoção de 75,96% (Tabela 8). Em seguida, destacaram-se as amostras tratadas com HCl por 20 h e 15 h, com ABS_PF de 0,036 e 0,042 e remoções de 71,02% e 66,07%, respectivamente (Tabela 9). Os tratamentos com NaOH resultaram em remoções mais modestas, da ordem de 33,10% a 50,41% (Tabela 10).

Esses resultados indicaram que, para a casca *in natura*, o tratamento ácido favoreceu a remoção de extrativos e impurezas superficiais, expondo grupos funcionais e poros que contribuíram para a adsorção do corante catiônico. Por outro lado, o tratamento básico possivelmente alterou a carga superficial e promoveu solubilização ou colapso de componentes da matriz lignocelulósica, reduzindo a eficiência de adsorção.

Tabela 8 – Casca *in natura* sem tratamento: absorvência e remoção percentual

Condição	Massa (g)	ABS	ABS_PF	Remoção (ABS_PF) %
Sem tratamento	1,0073	0,061	0,030	75,96

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Tabela 8 – Casca *in natura* tratada com HCl: absorvências e remoção percentual

Tratamento	Massa (g)	ABS	ABS_PF	Remoção (ABS_PF) %
HCl 5h	1,0031	0,114	0,043	65,25
HCl 15h	1,0025	0,080	0,042	66,07
HCl 20h	1,0071	0,095	0,036	71,02
Média				67,44

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

Tabela 10 – Casca *in natura* tratada com NaOH: absorvências e remoção percentual

Tratamento	Massa (g)	ABS	ABS_PF	Remoção (ABS_PF) %
NaOH 5h	1,0069	0,146	0,063	48,76
NaOH 15h	1,0023	0,183	0,061	50,41
NaOH 20h	1,0031	0,180	0,082	33,10
Média	-	-	-	44,09

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

4.7 Análise Comparativa dos Materiais Adsorventes

A análise comparativa das condições com maior remoção percentual (Tabela 11) evidenciou que o carvão ativado apresentou desempenho superior à casca de café *in natura* em praticamente todas as condições avaliadas. As maiores remoções foram obtidas para o carvão tratado com NaOH por 15 h (93,27%) e para o carvão tratado com HCl por 5 h (92,45%).

Tabela 9 – Cinco condições com maior remoção percentual com base em ABS_PF

Material	Condição de melhor desempenho	Remoção (ABS_PF) %
Carvão (NaOH)	NaOH 15h	93,27
Carvão (HCl)	HCl 5h	92,45
Carvão (HCl)	HCl 15h	90,80
Carvão (NaOH)	NaOH 5h	89,15
Carvão (NaOH)	NaOH 20h	88,33

Fonte: Elaborada pelos autores (2025).

De maneira geral, observou-se que:

- o processo de ativação térmica foi fundamental para o desenvolvimento de sítios ativos e de porosidade, conferindo ao carvão desempenho superior ao da biomassa sem carbonização;
- os tratamentos químicos, especialmente o básico para o carvão e o ácido para a casca, influenciaram diretamente a capacidade de adsorção, possivelmente por modificações na composição superficial, remoção de impurezas e alteração da área acessível ao corante;
- a casca *in natura* sem tratamento ainda apresentou remoção significativa (75,96%), o que reforçou o potencial de utilização direta desse resíduo em aplicações de menor exigência tecnológica ou como etapa preliminar em sistemas de tratamento de efluentes.

Em síntese, os resultados obtidos confirmaram que tanto o processo de ativação quanto os tratamentos químicos são etapas-chave para otimizar o desempenho adsorptivo de materiais derivados de casca de café, tornando-os competitivos em relação a carvões ativados comerciais para a remoção de corantes em meio aquoso.

5 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que a casca de café constitui um resíduo agroindustrial com potencial para produção de carvão ativado aplicado à remoção do corante azul de metileno em solução aquosa. A determinação do teor de umidade da casca *in natura* resultou em média de 12,97%, valor compatível com a literatura e relevante para o armazenamento e o processamento do material.

A avaliação do efeito da temperatura de calcinação indicou que a condição de 400 °C proporcionou equilíbrio adequado entre perda de massa e teor de carbono orgânico, permitindo a obtenção de carvão com rendimento e características favoráveis ao uso como adsorvente. Em temperaturas superiores, o teor de carbono orgânico diminuiu de forma acentuada, comprometendo a disponibilidade de frações carbonáceas para adsorção.

O carvão ativado produzido a 400 °C apresentou desempenho superior ao da casca de café *in natura* nos ensaios de adsorção do azul de metileno. O tratamento do carvão com NaOH por 15 h resultou na maior eficiência de remoção, alcançando 93,27%, seguido pelos tratamentos com HCl, que obtiveram remoções de até 92,45%. A casca *in natura* apresentou remoção máxima de 75,96% na condição sem tratamento, confirmando a contribuição da estrutura lignocelulósica e de grupos funcionais naturais para a adsorção do corante.

A análise conjunta dos resultados permitiu concluir que a combinação entre ativação térmica e tratamentos químicos foi determinante para o desenvolvimento de sítios ativos e para o aumento da capacidade de adsorção do material derivado da casca de café. Dessa forma, o carvão ativado obtido a partir desse resíduo se mostrou um adsorvente promissor para aplicação em processos de tratamento de efluentes contendo corantes, contribuindo para a valorização de resíduos agroindustriais e para o atendimento de metas associadas à sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. S.; FERREIRA NETO, V. J. M.; COSTA, T. S. B.; GASPAR, A. B.; MENDES, F. M. T.; LUNA, A. S.; HENRIQUES, C. A. Uso de carvão ativado obtido da palha de cana-de-açúcar para adsorção de HAPs - um estudo comparativo com materiais comerciais. **Tecnologia Ambiental**, v. 43, n. 6, p. 861-875, 2020. DOI: 10.1080/09593330.2020.1807611.

ARAÚJO, M. dos R. P.; SILVA, P. L. da; ROCHA, A. P. S. da. Cafeicultura: evolução do café no Brasil, Minas Gerais e no município de João Pinheiro - MG. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 11, p. 21683-21706, 2023. DOI: 10.56083/RCV3N11-091.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **O café brasileiro na atualidade**. Rio de Janeiro: ABIC, 2021. Disponível em: <https://www.abic.com.br/tudo-de-cafe/o-cafe-brasileiro-na-atualidade/>. Acesso em: 17 out. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6: água potável e saneamento**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>. Acesso em: 21 out. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12: consumo e produção responsáveis**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>. Acesso em: 21 out. 2025.

PEREIRA, L. A. da S. **Breve histórico da influência da cafeicultura na vida social, econômica e política do Brasil, em seus primórdios até meados da década de 30**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Cafeicultura) – Escola Agrotécnica Federal de Muzambinho, Muzambinho, 2008.

RAMOS, P. H.; GUERREIRO, M. C.; RESENDE, E. C. de; GONÇALVES, M. Produção e caracterização de carvão ativado produzido a partir do defeito preto, verde, ardido (PVA) do café. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 5, p. 1139-1143, 2009. DOI: 10.1590/S0100-40422009000500011.

SANTOS, G. B. S.; TEDESCO, L. D.; RAVANI, R. T.; FRAGA, T. R. A.; HALASZ, M. R. T. Produção de carvão ativado a partir da casca de café. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 1., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]. Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, p. 487-492, 2015. ISSN 2359-1757. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/produo-de-carvo-ativado-a-partir-da-casca-de-caf-19681>. Acesso em: 21 out. 2025.

SCHULTZ, J. **Obtenção de carvão ativado a partir de biomassa residual para a adsorção de poluentes**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/48962>. Acesso em: 21 out. 2025.

SILVA, O. M. das C.; HERNÁNDEZ, M. M.; ARAÚJO, G. do C. R.; CUNHA, F. L.; EVANGELISTA, D. V. da P.; LELES, P. S. dos S.; MELO, L. A. de. Potencial uso da casca de café como constituinte de substrato para produção de mudas de espécies florestais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 1161-1175, dez. 2020. DOI: 10.5902/1980509842500.

SILVA, T. R.; MAHMOUD, F. H.; MENDONÇA, A. C. Economia circular: aproveitamento da casca de café como adubo orgânico. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE - ENGEMA*, 23., 2023, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: USP, 2023. Disponível em: <https://engemausp.submissao.com.br/23/arquivos/568.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025.

VIEIRA, T. F. **Equilíbrio higroscópico da casca do café arábica**. 2015. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6640/2/CM_COEAL_2015_1_15.pdf. Acesso em: 23 out. 2025.