

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
GRADUAÇÃO EM QUÍMICA INDUSTRIAL



PALOMA EDUARDA BARBOSA CORREA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ADSORÇÃO COMO
ALTERNATIVA DE TRATAMENTO PARA EFLUENTE GERADO DURANTE A
GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Uberlândia- MG

2025

PALOMA EDUARDA BARBOSA CORREA

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ADSORÇÃO COMO
ALTERNATIVA DE TRATAMENTO PARA EFLUENTE GERADO DURANTE A
GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Química Industrial, do Instituto
de Química da Universidade Federal de
Uberlândia, como exigência para a obtenção
do título de Bacharel em Química Industrial

Orientador: Prof. Dr. Alam Gustavo Trovó

Coorientadora: Ma. Gabrielly Machado dos Santos

Uberlândia - MG

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C824	Correa, Paloma Eduarda Barbosa, 1999-
2025	CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ADSORÇÃO COMO ALTERNATIVA DE TRATAMENTO PARA EFLUENTE GERADO DURANTE A GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS [recurso eletrônico] : CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ADSORÇÃO COMO ALTERNATIVA DE TRATAMENTO PARA EFLUENTE GERADO DURANTE A GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS / Paloma Eduarda Barbosa Correa. - 2025.
<p>Orientador: ALAM TROVÓ. Coorientador: GABRIELLY SANTOS. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Química Industrial. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia.</p>	
<p>1. Tecnologia química. I. TROVÓ, ALAM, 1980-, (Orient.). II. SANTOS, GABRIELLY, 1999-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Química Industrial. IV. Título.</p>	
CDU: 660.2	

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Curso de Graduação em Química Industrial
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1A, Sala 1A233 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4103 - coqin@iqufu.ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Química Industrial				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso - GQB056				
Data:	23/09/2025	Hora de início:	09:00 h	Hora de encerramento:	11:30 h
Matrícula do Discente:	11911QID044				
Nome do Discente:	Paloma Eduarda Barbosa Correa				
Título do Trabalho:	Caracterização e avaliação do processo de adsorção como alternativa de tratamento para efluente gerado durante a gaseificação de resíduos sólidos				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não				

Reuniu-se no Laboratório de Ensino de Química - LENQ, na sala 313 do bloco 1M no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Coordenador do Curso de Graduação em Química Industrial, assim composta: Prof. Dr. Alam Gustavo Trovó - **Orientador**; Prof.ª Dr.ª Sheila Cristina Canobre - Titular; Doutorando Lucas Gustavo da Costa - Titular e Prof. Dr. Fábio Augusto do Amaral - Suplente.

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa, Dr. Alam Gustavo Trovó, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao(à) discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a) Nota: 88 pontos
 Reprovado(a)

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Alam Gustavo Trovo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/09/2025, às 14:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sheila Cristina Canobre, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/09/2025, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Gustavo Costa, Usuário Externo**, em 25/09/2025, às 09:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6692175** e o código CRC **B5847693**.

Referência: Processo nº 23117.065418/2025-17

SEI nº 6692175

AGRADECIMENTOS

Esse Trabalho de Conclusão de Curso representa muito mais do que o fim de uma etapa acadêmica, simboliza a concretização de um sonho.

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me fortalecer nos momentos de incerteza que acabou surgindo durante a graduação e por ter me guiado ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Simone e José Luiz, agradeço pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, pelo apoio em cada decisão e por estarem sempre presentes, mesmo à distância. A minha irmã Alice e ao meu namorado Marcus Vinícius, pela paciência e incentivo.

Agradeço, de modo geral, a todos os professores que contribuíram para a minha formação. Em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Alam Gustavo Trovó, pela orientação, paciência, disponibilidade e por compartilhar parte de seu conhecimento, que foi extremamente importante para o desenvolvimento deste trabalho. À minha coorientadora, Ma. Gabrielly Machado dos Santos, agradeço imensamente pelo incentivo constante, apoio e dedicação durante a fase experimental desta pesquisa.

Agradeço a Profa. Dr.^a Sheila e ao Me. Lucas por terem aceitado o convite para integrar a banca examinadora.

Agradeço ao laboratório LAETE em especial aos integrantes de pesquisa Lucilene Cândida dos Santos e Eduardo Ribeiro Marinho por disponibilizar amostras do adsorvente de caroço de açaí, para realização desse trabalho.

Ao Instituto de Engenharia Química por disponibilizar o equipamento analisador de carbono para as análises de carbono total, carbono inorgânico e carbono orgânico.

Sou grata, também, à Universidade Federal de Uberlândia e ao Instituto de Química, pelo ambiente de aprendizado, e pela infraestrutura disponibilizada. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, deixo aqui o meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

A gaseificação de resíduos sólidos, embora seja uma alternativa eficiente para a geração de energia, produz efluentes líquidos com elevada carga poluidora, os quais necessitam de tratamento adequado para viabilizar seu descarte ou reuso. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o processo de adsorção como alternativa de tratamento, com ênfase no reaproveitamento do efluente no próprio processo industrial. Para isso foram avaliados dois adsorventes, o carvão ativado comercial e o biocarvão produzido a partir de caroço de açaí. Inicialmente, o efluente foi caracterizado quanto aos parâmetros físico-químicos, apresentando acidez elevada (pH 3,7), fora do intervalo permitido pela Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece pH entre 5,0 e 9,0 para lançamento em corpos hídricos e além disso, o efluente apresentou alta carga orgânica, medida como demanda química de oxigênio - DQO (6875 ± 321 mg O₂/L), elevado teor de carbono orgânico dissolvido - COD (1620 ± 9 mg/L), presença significativa de óleos e graxas (392 ± 83 mg/L) e cor real intensa (1399 ± 49 mg/L Pt/Co), consideravelmente elevados de acordo com a mesma resolução reforçando a necessidade de tratamento prévio antes do descarte ou reuso. Para verificar a eficiência do processo de adsorção, foram avaliadas diferentes condições operacionais: concentração do adsorvente (0,5 a 5,0 g/L), tempo de contato (5 a 80 minutos) e aplicação em ciclos sequenciais. O aumento da concentração de carvão ativado de 0,5 até 3,0 g/L aumentou a eficiência de remoção de cor e DQO, alcançando um máximo de 51% e 10%, respectivamente enquanto concentrações superiores (4,0 e 5,0 g/L) não apresentaram ganhos significativos. Quanto ao tempo de contato, não foram observadas melhorias expressivas acima de 5 minutos, que foi definido como o tempo ótimo por aliar eficiência e simplicidade operacional. Nos testes de adsorção sequencial, avaliou-se o fracionamento de 3,0 g/L em três ciclos de 1,0 g/L. Entretanto, não houve aumento relevante na remoção em comparação com a aplicação direta de 3,0 g/L. Também foi observado que o biocarvão de caroço de açaí apresentou uma melhor eficiência para remoção de cor real e DQO. Com base neste estudo e considerando a baixa remoção de cor e principalmente de DQO, sugere-se para estudos futuros a necessidade de testes avaliando o efeito do pH e também o uso de outros materiais adsorventes.

Palavras chaves: Biocarvão; Carvão ativado; Efluente industrial; Sustentabilidade; Tratamento de efluente; Resíduo sólido.

ABSTRACT

The gasification of solid waste, although an efficient alternative for energy generation, produces liquid effluents with a high pollutant load, which require proper treatment to enable their disposal or reuse. In this context, the present study aimed to evaluate the adsorption process as a treatment alternative, with emphasis on the reuse of the effluent in the industrial process itself. For this purpose, two adsorbents were tested: commercial activated carbon and biochar produced from açaí seed. Initially, the effluent was characterized in terms of physicochemical parameters, showing high acidity (pH 3.7), outside the range permitted by CONAMA Resolution No. 430/2011, which establishes a pH between 5.0 and 9.0 for discharge into water bodies. In addition, the effluent presented a high organic load, measured as chemical oxygen demand – COD (6875 ± 321 mg O₂/L), high dissolved organic carbon – DOC (1620 ± 9 mg/L), significant presence of oils and greases (392 ± 83 mg/L), and intense true color (1399 ± 49 mg/L Pt/Co), all considerably high according to the same resolution, reinforcing the need for pretreatment prior to disposal or reuse. To verify the efficiency of the adsorption process, different operational conditions were evaluated: adsorbent concentration (0.5 to 5.0 g/L), contact time (5 to 80 minutes), and application in sequential cycles. Increasing the activated carbon concentration from 0.5 to 3.0 g/L improved the removal efficiency of color and COD, reaching a maximum of 51% and 10%, respectively, while higher concentrations (4.0 and 5.0 g/L) showed no significant gains. Regarding contact time, no expressive improvements were observed above 5 minutes, which was defined as the optimum time for combining efficiency and operational simplicity. In sequential adsorption tests, the fractionation of 3.0 g/L into three cycles of 1.0 g/L was evaluated. However, no relevant increase in removal was observed compared to the direct application of 3.0 g/L. It was also observed that açaí seed biochar presented better efficiency in the removal of true color and COD. Based on this study and considering the low removal of color and especially COD, future studies are suggested to evaluate the effect of pH as well as the use of other adsorbent materials.

Keywords: Biochar; Activated carbon; Industrial effluent; Sustainability; Effluent treatment; solid waste.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Escala logarítmica pH	24
Figura 2. Influência da concentração de carvão ativado na remoção de cor real e DQO durante tempo de exposição de 5 min.	38
Figura 3. Influência do tempo de exposição na remoção de cor real e DQO na presença de 3 g/L de carvão ativado.	39
Figura 4. Influência de três ciclos sucessivos (1 g/L de cada material adsorvente por ciclo, totalizando 3 g/L) de aplicação de carvão ativado (símbolos fechados) e biocarvão de açaí (símbolos abertos) na remoção de cor real e DQO durante um tempo de exposição de 5 min/ciclo.	40
Figura 5. Micrografias da análise do MEV para o biocarvão ativado de caroço de açaí com ampliação de 500x	41
Figura 6. Micrografias da análise do MEV para o carvão ativado comercial com ampliação de 500x	42

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos do efluente do lavador de gases. 34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Potencial hidrogeniônico (pH)
Carbono total dissolvido (CTD)
Carbono inorgânico dissolvido (CID)
Carbono orgânico dissolvido (COD)
Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)
Demanda química de oxigênio (DQO)
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)
Sólidos totais (ST)
Sólidos dissolvidos (SD)
Sólidos em suspensão (SS_{usp})
Sólidos sedimentáveis (SS_{edi})
Microscópia Eletrônica de Varredura (MEV)
Ácido fosfórico (H₃PO₄)
Angstroms (Å) (1 angstrom (Å) = 10⁻¹⁰ metros)
Limite de quantificação (LQ)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Reutilização da água como estratégia sustentável	12
1.2. Adsorção	13
1.3. Carvão ativado	13
1.4. Biocarvão - Biochar	14
1.5. Gaseificação como fonte geradora de efluente complexo	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 Geral	17
2.2 Específicos	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1. Equipamentos e utensílios	18
3.2. Reagentes	19
3.3. Origem do efluente	20
3.4 Análises químicas para caracterização do efluente	20
3.4.1. Determinação da alcalinidade.....	20
3.4.2. Determinação de carbono total dissolvido (CTD).....	21
3.4.2. Determinação de carbono inorgânico dissolvido (CID).....	21
3.4.2. Determinação de carbono orgânico dissolvido (COD)	21
3.4.3. Determinação da demanda química de oxigênio (DQO).....	22
3.4.4. Determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO).....	23
3.4.5. Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)	24
3.4.6. Determinação de sólidos totais (ST).....	24
3.4.7. Determinação de sólidos dissolvidos (SD).....	25
3.4.8. Determinação de sólidos em suspensão (SS _{usp}).....	26
3.4.9. Determinação de sólidos sedimentáveis (SS _{edi}).....	27
3.4.10. Determinação de amônia, nitrato e nitrito	27
3.4.11. Determinação de óleos e graxas	28
3.4.12. Determinação da condutividade	28
3.4.13. Determinação da turbidez.....	29
3.4.14. Determinação da cor real e cor aparente	29
3.4.15. Determinação de cloreto	30

3.5. Síntese e caracterização dos materiais adsorventes.....	30
3.5.1. Síntese do biocarvão a partir de caroço de açaí	31
3.5.2. Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	31
3.6. Avaliação do processo de adsorção para tratamento do efluente	31
3.6.1. Influência da concentração de carvão ativado	31
3.6.2. Influência do tempo de contato com carvão ativado	32
3.6.3. Influência de adsorção sequencial com carvão ativado	32
3.6.4. Avaliação do uso de biocarvão produzido a partir de caroço de açaí.....	33
3.6.5 Avaliação da síntese do biocarvão e carvão ativado comercial através do (MEV)	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. Caracterização do efluente gerado no lavador de gases	34
4.2. Influência da concentração de carvão ativado comercial	37
4.3. Influência do tempo de contato	38
4.4. Efeito da adsorção sequencial e de diferentes materiais adsorventes (carvão ativado x biocarvão de açaí)	39
5. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS	44
ANEXOS	49

1. INTRODUÇÃO

1.1. Reutilização da água como estratégia sustentável

A água é um dos elementos fundamentais para o equilíbrio dos ecossistemas naturais e para manutenção da vida. No entanto, apesar de sua grande importância, observa-se um consumo indiscriminado por parte da população e, principalmente, por setores industriais, que frequentemente utilizam grandes volumes sem realizar o reaproveitamento adequado. Esse desperdício torna ainda mais preocupante quando considera a baixa disponibilidade de água doce no planeta. Embora a superfície terrestre é coberta por água, aproximadamente 97,5 % desse total é salgada e imprópria para o consumo, a menos que passe pelo processo de dessalinização, uma alternativa ainda inviável devido ao seu alto custo (Gaio, 2016).

Dessa pequena fração, apenas 2,5% corresponde à água doce, porém a maior parte não está disponível para o consumo dos seres vivos. Na prática, apenas 0,44% é realmente acessível (Agência Nacional de Águas, 2013). Diante desse cenário de escassez, a prática do reuso da água, também denominada reaproveitamento de águas residuárias, surge como uma alternativa essencial. Trata-se de uma estratégia antiga, com primeiros registros históricos na Grécia Antiga, onde efluentes eram empregados em atividades de irrigação (Lima, 2016). Atualmente, o aumento significativo da demanda hídrica tem trazido à tona a grande importância do reuso planejado como alternativa viável para a conservação dos recursos hídricos.

No contexto brasileiro, essa prática se mostra ainda mais relevante. Embora o Brasil seja um país privilegiado em recursos hídricos, há uma distribuição desigual pelo território nacional. As regiões mais populosas concentram a menor parte dos recursos disponíveis, o que agrava os desafios relacionados ao abastecimento e à gestão sustentável da água (Bellver-Domingo; Hernández-Sancho, 2022).

Nesse sentido, o reuso deve ser compreendido como uma parte integrante de um uso racional, conceito mais amplo que engloba ações como o controle de perda e a minimização da geração de resíduos. Essa prática permite, por exemplo, a substituição da água potável por uma água de qualidade inferior, especialmente quando destinada a finalidades que não exigem padrões rigorosos de potabilidade. Conforme a intenção de

uso, as características da água podem ser ajustadas, sendo fixado um padrão mínimo relativo à sua aplicação (Fernandes de Souza Moura; Marques; Freitas, 2018).

Além disso, investir em processos eficazes de tratamento de água, esgoto e efluentes traz benefícios não apenas ambientais, mas também econômicos. Estima-se que para cada dólar investido em saneamento básico, são economizados cerca de três dólares e meio em tratamento e saúde (Moura, 2018). Isso demonstra que investir em tecnologias voltadas à purificação e reaproveitamento da água não só melhora a qualidade de vida da população, como também contribui para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos, especialmente em um cenário de recente escassez. Nesse contexto, torna-se relevante explorar alternativas tecnológicas que potencializem esse processo, como é o caso da adsorção.

1.2. Adsorção

Adsorção trata-se de um processo de transferência de massa baseado na capacidade de determinados sólidos em reter, em sua superfície, substâncias presentes em fluidos, sejam eles líquidos ou gasosos. Essa retenção superficial permite a separação seletiva dos componentes presentes na mistura fluida (Pinheiro et al., 2023).

O fenômeno ocorre quando uma molécula, geralmente do contaminante a ser removido, atinge a superfície do adsorvente, como o carvão ativado, e ali permanece, devido a ação de forças físicas ou químicas (Moura et al., 2018).

Entre os diferentes métodos aplicáveis ao tratamento de efluentes, a adsorção se sobressai por sua elevada eficiência na remoção de poluentes, especialmente compostos tóxicos presentes em águas e águas residuárias (Hao et al., 2021).

Nas últimas décadas, a adsorção tem se destacado como um dos métodos mais promissores para processos de separação e purificação, consolidando-se como uma tecnologia amplamente utilizada. Esse mecanismo tem despertado interesse devido à sua versatilidade tecnológica e à ampla aplicação em diversos setores (Hao et al., 2021).

1.3. Carvão ativado

O carvão ativado é um material de origem natural, altamente poroso e sua estrutura interna favorece a remoção de contaminantes, sendo especialmente útil em

processos de tratamento de água e efluentes. Entre os materiais adsorventes é considerado o mais popular e pode ser obtido a partir de matérias-primas orgânicas ricas em carbono, como madeira, carvão mineral, ou mesmo por meio da carbonização de diversos tipos de biomassas a altas temperaturas, como o cupuaçu, açaí ou resíduos agrícolas (Westphalen et al., 2016).

O processo de ativação ocorre por oxidação controlada. Ele pode ser físico (com calor e vapor) ou químico (com agentes ativantes, como ácido fosfórico ou cloreto de zinco). O objetivo é ampliar a área superficial do material, criando uma estrutura altamente porosa, ideal para processos de adsorção (Claudino, 2003).

A eficiência da adsorção está diretamente relacionada à compatibilidade do tamanho e polaridade das moléculas a serem adsorvidas e o tamanho dos poros do adsorvente (Claudino, 2003).

No contexto do tratamento de efluentes líquidos, o carvão ativado tem sido empregado com sucesso na remoção de substâncias tóxicas como pesticidas e outros poluentes, contribuindo para a melhoria da qualidade da água e para o cumprimento aos padrões ambientais de descarte (Raasch; Sá; Santana., 2024).

Apesar da ampla utilização do carvão ativado, a busca por alternativas mais sustentáveis e econômica viáveis tem impulsionado pesquisas voltadas a novos materiais adsorventes.

1.4. Biocarvão – *Biochar*

Na busca por novos meios de tratamento e alternativas de materiais adsorventes, surge o biocarvão, também conhecido como *biochar*. Trata-se de um material carbonáceo obtido por meio da pirólise de biomassa, um processo termoquímico realizado na ausência (ou com baixa presença) de oxigênio, que transforma resíduos orgânicos em subprodutos como o bio-óleo, gás de síntese e o próprio biocarvão (Cardoso Júnior, 2022).

O rendimento e as propriedades do *biochar* variam conforme os fatores: tipo de biomassa, temperatura do processo, taxa de aquecimento, tempo de residência e presença de catalisadores (Siddiqui, 2025). O produto sólido resultante apresenta alta concentração de carbono, estrutura porosa e grande área superficial, características que o tornam promissor para diferentes aplicações (Guilhen, 2020).

Além de suas características físico-químicas, o biocarvão oferece benefícios agronômicos e ambientais amplamente reconhecidos. Quando aplicado ao solo, contribui para o aumento da porosidade, redução da densidade aparente e melhoria na capacidade de retenção de água, fatores que favorecem a infiltração e reduzem a ocorrência de processos erosivos. Estudos demonstram que sua aplicação pode elevar a porosidade do solo em até 64 % e reduzir a densidade aparente em até 31 %, promovendo melhorias significativas na qualidade do solo (Kumar; Singh; Sharma, 2021). Também aumenta a retenção de nutrientes e a capacidade de troca catiônica, otimizando a disponibilidade de elementos essenciais às plantas e estimulando a atividade microbiana (Kumar; Singh; Sharma, 2021).

Outro aspecto relevante é seu papel ambiental, especialmente no sequestro de carbono. Devido à sua alta estabilidade química e resistência à degradação, o biocarvão pode permanecer no solo por séculos ou até milênios, atuando como um sumidouro de carbono e contribui para a mitigação das mudanças climáticas (Silva, 2023). Dessa forma, sua utilização está alinhada às práticas de agricultura sustentável, à economia circular e à redução de impactos ambientais.

Considerando tais benefícios, diferentes resíduos agroindustriais têm sido investigados como matérias-primas para a produção de biocarvão, destacando-se o caroço de açaí. O açaí é um fruto amplamente consumido no Brasil e proveniente, em sua maioria, da região Amazônica. No entanto, apenas cerca de 10 % do fruto é efetivamente aproveitado para consumo, enquanto aproximadamente 90 % (os caroços) são descartados sem reaproveitamento adequado, representando um volume significativo de resíduo orgânico (Marinho, 2025). Esse subaproveitamento gera desafios ambientais, como o acúmulo de resíduos em áreas urbanas e rurais, além da emissão de gases pela decomposição inadequada. O processamento desses resíduos em biocarvão representa não apenas uma alternativa de gestão sustentável, mas também uma oportunidade econômica, já que estudos estimam que o custo de reaproveitamento do caroço de açaí para obtenção de biocarvão é relativamente baixo quando comparado a outros adsorventes comerciais (Oliveira, 2014).

1.5. Gaseificação como fonte geradora de efluente complexo

A gaseificação é um processo termoquímico que, em condições de temperaturas geralmente superiores a 800 °C, promove a conversão de materiais carbonáceos em um gás combustível. Durante essa conversão, formam-se diferentes espécies gasosas, entre elas monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂), metano (CH₄), vapor de água e hidrocarbonetos de baixa massa molar, além de contaminantes como alcatrões e material particulado (Raasch; Sá; Santana, 2024).

Em linhas gerais, o processo ocorre em reatores operando entre 500 e 800 °C, sob condições de baixa disponibilidade de oxigênio. Nesses parâmetros, não há combustão direta do resíduo sólido, mas sim sua transformação em uma mistura de gases inorgânicos e orgânicos (Ungureanu et al., 2025).

Um estágio fundamental na gaseificação é a lavagem dos gases produzidos, cujo objetivo é remover material particulado. No entanto, essa etapa gera efluentes com elevada carga poluente, ricos em sólidos suspensos, matéria orgânica dissolvida e compostos fenólicos estes últimos são recalcitrantes e altamente tóxicos (Ferreira, 2019).

Assim a presença desses contaminantes torna indispensável a adoção de métodos de tratamento adequados, a fim de viabilizar o descarte seguro ou até mesmo o reaproveitamento do efluente. Nesse contexto, a adsorção surge como alternativa promissora, possibilitando o reuso no próprio processo industrial e contribuindo para a sustentabilidade e mitigação de impactos ambientais.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Caracterizar o efluente gerado no processo de gaseificação de resíduos de serragem de MDF e avaliar a eficiência do carvão ativado, tanto comercial quanto o obtido a partir de biomassa (biocarvão) de caroço de açaí, como alternativa de tratamento e reuso do efluente no próprio âmbito industrial.

2.2. Específicos

- Analisar a influência da concentração de carvão ativado sobre a remoção de cor real, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e condutividade do efluente;
- Analisar o efeito do tempo de contato entre o carvão ativado e o efluente na remoção de cor real e DQO;
- Analisar e comparar a eficiência da adsorção sequencial em ciclos sucessivos em relação à adsorção em uma única etapa, na remoção de cor real e DQO;
- Comparar o desempenho do carvão ativado comercial e do biocarvão produzido a partir de caroço de açaí na remoção de cor real e DQO;
- Avaliar a morfologia, por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e relacionar com o desempenho adsorptivo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Equipamentos e utensílios

Os equipamentos e utensílios utilizados na execução deste trabalho foram:

- Agitador magnético – FISATOM;
- Balança analítica AUY 220 ± 0,0001 g – SHIMADZU;
- Analisador TOC-L – SHIMADZU;
- Béqueres, buretas, erlenmeyers, provetas e outras vidrarias de diferentes volumes – Marcas diversas;
- Bloco digestor para DQO – HACH;
- Espectrofotômetro PHOTOMETER UV-1800 - SHIMADZU;
- Kit Oxitop IS-WTW
- Membranas de filtração (0,45 µm) de Politetrafluoretileno (PTFE) hidrofílica para seringa – FILTRILO;
- Micropipetas 1000 e 100 µL – Marcas diversas;
- Papel filtro qualitativo – UNIFIL, faixa azul;
- pHmetro de bancada mPA-210 – MS TECNOPON;
- Seringas de 3 mL – DESCARPACK;
- Frascos para armazenagem – Marcas diversas;
- Filtro de papel quantitativo - Unifil 12,5cm
- Conjunto de filtração de vidro;
- Bomba de vácuo (PRISMATEC);
- Condutivímetro TEC4-MP da Tecnal;
- Turbidímetro 2100Q-HACH;
- Microscópio eletrônico de varredura (MEV)-Tescan, modelo VEGA 3 LMU;
- Multiparamêtro -Hanna- HI83099 COD and Multiparameter Photometer.

3.2. Reagentes

Os reagentes utilizados na execução deste trabalho foram:

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) (PA) – Synth – [nº CAS 7664-93-9] – Utilizado na determinação de demanda química de oxigênio (DQO) na forma concentrada e, na concentração de 0,1 mol/L como titulante na determinação da alcalinidade;
- Alaranjado de metila ($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$) (PA) – Vetec – [nº CAS 547-58-0] – Utilizado como indicador na determinação da alcalinidade;
- Carvão ativado (PA) [nº CAS 7440-44-0] em pó purificado – Dinâmica – Utilizado para avaliação da adsorção;
- Cloreto de amônio (NH_4Cl) – Synth – [nº CAS 12125-02-9] – Utilizado para promover a atividade microbiológica na determinação de demanda bioquímica de oxigênio, na concentração de 0,71 mol/L e também no preparo da solução tampão fosfato também para determinação de demanda bioquímica de oxigênio;
- Cloreto de cálcio ($CaCl_2$) – Vetec – [nº CAS 10043-52-4] – Utilizado para promover a atividade microbiológica na determinação de demanda bioquímica de oxigênio, na concentração de 0,25 mol/L;
- Cloreto férrico ($FeCl_3$) – Vetec – [nº CAS 7705-08-0] – Utilizado como reagente para promover a atividade microbiológica na determinação de demanda bioquímica de oxigênio; preparo de solução estoque 0,0015 mol/L;
- Cloreto férrico hexahidratado – ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) – Vetec – [nº CAS 10025-77-1] – Utilizado como reagente para promover a atividade microbiológica na determinação de demanda bioquímica de oxigênio; preparo de solução estoque 0,0015 mol/L;
- Cromato de potássio (K_2CrO_4) (PA) – Dinâmica Química – [nº CAS 7789-00-6] – Indicador para determinar cloreto;
- Dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) (PA) – Vetec – [nº CAS 7778-50-9] – Utilizado na determinação da demanda química de oxigênio;
- Fosfato dissódico (Na_2HPO_4) – Synth – [nº CAS 10028-24-7] – Utilizado para o preparo do tampão fosfato para a determinação da demanda bioquímica de oxigênio;
- Fosfato dissódico hepta-hidratado ($Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$) – Synth – [nº CAS 7782-85-6] – Utilizado para o preparo da solução tampão fosfato para a determinação da demanda bioquímica de oxigênio;

- Fosfato monopotássico (KH_2PO_4) – Synth – [nº CAS 7778-77-0] – Utilizado para o preparo da solução tampão fosfato para a determinação da demanda bioquímica de oxigênio;
- Inibidor ($\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$) – WTW – Utilizado na determinação de demanda bioquímica de oxigênio;
- Nitrato de prata (AgNO_3) (PA) – Dinâmica Química – [nº CAS 7761-88-8] – Solução padrão – Utilizado na determinação da demanda bioquímica de oxigênio e na determinação de cloreto na concentração 0,0141 mol/L;
- Semente para DBO – Polyssed – Utilizado na determinação de demanda bioquímica de oxigênio;
- Sulfato de Magnésio (MgSO_4) – [nº CAS 7487-88-9] – Utilizado para promover a atividade microbiológica na determinação da demanda bioquímica de oxigênio, na concentração de 0,19 mol/L;
- Sulfato de Mercúrio (HgSO_4) (PA) – Vetec – [nº CAS 7783-35-9] – Utilizado na determinação da demanda química de oxigênio;
- Sulfato de Prata (Ag_2SO_4) (PA) – Vetec – [nº CAS 10294-26-5] – Utilizado na determinação da demanda química de oxigênio.

3.3. Origem do efluente

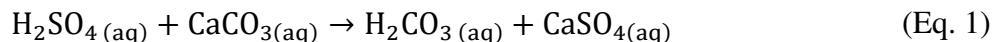
O efluente industrial foi coletado no lavador de gás de uma planta piloto em teste, projetada para a produção de energia elétrica por gaseificação a partir de diferentes tipos de resíduos sólidos, como serragem de MDF, que era matéria prima utilizada na caldeira quando ocorreu a amostragem.

3.4. Análises químicas para caracterização do efluente

3.4.1. Determinação da alcalinidade

A alcalinidade representa a capacidade de um sistema aquoso neutralizar a ação de ácidos do efluente. A alcalinidade foi determinada por meio de titulação ácido-base. Nesse procedimento, utilizou-se o alaranjado de metila como indicador e ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,1 mol/L como titulante.

A titulação prossegue com a adição gota a gota do ácido à amostra até atingir um pH de 4,5, ponto em que ocorre uma mudança na coloração para um tom levemente avermelhado, indicando o ponto final da reação (Equação 1), (American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, 2023).



A alcalinidade da amostra é obtida através da Equação 2, sendo expressa em miligramas de carbonato de cálcio (CaCO_3) por litro.

$$\text{Alcalinidade (mg CaCO}_3\text{/L)} = \frac{\text{V}_a * \text{N}_a * 50000}{\text{V}_b} \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo que, V_a representa o volume do ácido titulante, N_a molaridade do ácido titulante e V_b o volume de amostra.

3.4.2. Determinação de Carbono Total Dissolvido (CTD), Carbono Inorgânico Dissolvido (CID) e Carbono Orgânico Dissolvido (COD)

A quantificação dos teores de CTD, CID e COD foi realizada utilizando um analisador de carbono modelo TOC-VCPh/CPN da marca Shimadzu, acoplado a um injetor automático ASI-V. Antes da injeção no equipamento, as amostras foram previamente filtradas por membranas de politetrafluoretileno (PTFE) com porosidade de 0,45 μm , (American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, 2023).

No processo de análise do CTD, a amostra é submetida à combustão catalítica a 680 °C, utilizando um catalisador de platina adsorvida em alumina. A combustão promove a conversão do carbono dissolvido presente na amostra em dióxido de carbono (CO_2), o qual é detectado por absorção em infravermelho (NDIR – *non-dispersive infrared*), gerando um sinal proporcional à concentração de carbono total dissolvido.

Para a determinação do CID, adiciona-se ácido fosfórico a 25 % (v/v) à amostra, promovendo a acidificação e a consequente conversão dos compostos inorgânicos de

carbono em CO₂. Durante esse processo, a amostra é submetida ao borbulhamento com ar sintético de alta pureza, assegurando a remoção completa do dióxido de carbono gerado. Assim como na análise de CTD, o CO₂ liberado é quantificado por meio da técnica de infravermelho não dispersivo.

O valor do (COD) conforme a Equação 3.

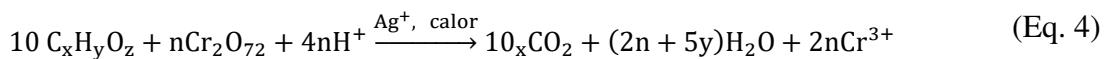
$$\text{COD} = \text{CTD} - \text{CID} \quad (\text{Eq. 3})$$

3.4.3. Determinação de Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A DQO é um parâmetro fundamental na caracterização de efluentes e em análise de qualidade de água, pois representa a quantidade de oxigênio necessário para a oxidação química da matéria orgânica presente na amostra. Esse indicador fornece uma estimativa da carga orgânica total, incluindo compostos biodegradáveis e não biodegradáveis. O método não diferencia matéria orgânica biodegradáveis de não biodegradáveis, sendo assim, com poucas exceções, podem ser oxidados compostos orgânicos pela ação de um agente forte em meio ácido (Bottega, 2022)).

A determinação da DQO foi realizada com base na digestão da amostra em meio ácido na presença do oxidante dicromato, o qual promove a conversão da matéria orgânica em CO₂ e água H₂O, na presença de sulfato de prata como catalisador (Eq. 4) (American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2023).

As amostras foram analisadas em sua forma bruta, sem a realização de filtração prévia. Em um tubo de reação, foram adicionados 0,04 g de sulfato de mercúrio (HgSO₄), 2,5 mL de solução de ácido sulfúrico contendo sulfato de prata (Ag₂SO₄), 0,5 mL de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) a 0,167 mol/L 0,3 mL de água destilada e 2,0 mL da amostra. Após homogeneização, o tubo foi submetido à digestão em bloco aquecido a 150 °C por um período de 2 horas.



A concentração de íons Cr^{3+} formada após a digestão, que é proporcional à quantidade de matéria orgânica oxidada, foi quantificada por espectrofotometria UV-Vis. A leitura foi realizada a 600 nm, faixa adequada para a detecção específica do Cr^{3+} , sendo a precisão da quantificação dependente da escolha correta desse comprimento de onda.

As análises foram realizadas em uma faixa de quantificação de DQO entre 100 e 1200 mg O_2/L . Para a amostra do efluente se enquadrar dentro da faixa de quantificação, a mesma foi diluída com água destilada.

Os resultados foram obtidos a partir da curva de calibração construída, cuja equação da reta é $y = 0,0004x + 0,0099$ ($R^2 = 0,9999$) (Anexo I), a qual permitiu a conversão das leituras de absorbância em valores de concentração.

3.4.4. Determinação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A DBO é um dos principais parâmetros utilizados na avaliação da qualidade da água, por refletir a fração biodegradável da matéria orgânica presente em uma amostra.

As determinações foram realizadas conforme o Método Padrão 5210D (Schulz et al., 2014), utilizando o sistema Oxitop IS-6 WTW, aliado a uma incubadora modelo TE-371 (TECNAL), que garantiu o controle da temperatura a 20 °C durante o período de análise.

As amostras foram acondicionadas em frascos próprios para o ensaio, onde foram adicionados os reagentes necessários para promover a atividade microbiológica: tampão fosfato, NH_4Cl , MgSO_4 , CaCl_2 , FeCl_3 , inibidor de nitrificação, além de inóculo liofilizado e pastilhas de NaOH , estas últimas inseridas no tubo de borracha conectado ao Oxitop.

Em seguida, os frascos foram fechados e submetidos à incubação sob agitação magnética a 20 °C. O pH das soluções, incluindo a amostra e o controle com água destilada, foi ajustado para valores entre 6,8 e 7,2. As quantidades dos reagentes adicionados variaram conforme a DBO estimada (calculada como DQO/2) e o volume do recipiente utilizado.

Finalizado o período de incubação de 5 dias, o teor de oxigênio dissolvido remanescente foi medido, permitindo o cálculo da DBO da amostra.

3.4.5. Determinação do Potencial Hidrogeniônico (pH)

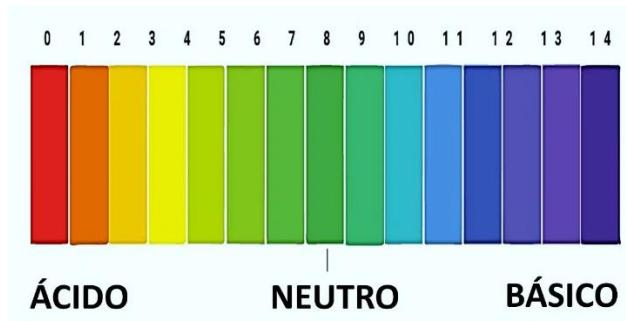
O pH é uma medida fundamental que indica a acidez ou basicidade de uma solução aquosa, ou seja, é uma medida entre a concentração H^+ (íons hidrogênio) e OH^- (íons hidroxila). Quando há excesso de OH^- , o caráter apresentará caráter básico, e quando houver predominância de H^+ no meio, o caráter será ácido. Se a solução apresentar a mesma quantidade de íons, a solução possuirá caráter neutro.

O pH do efluente analisado foi determinado utilizando um pHmetro de bancada mPA-210 da MS Tecnopen. Antes da medição, o aparelho foi calibrado com duas soluções padrão de pH 4,00 e 7,00, em uma temperatura ambiente de 25 °C.

A escala logarítmica é expressa entre 0 e 14 (Eq. 5 e **Figura 1**).

$$pH = -\log [H^+] \quad (\text{Eq. 5})$$

Figura 1. Escala logarítmica pH.



Fonte: Toda Matéria, 2019.

3.4.6. Determinação dos Sólidos Totais (ST)

A quantificação dos ST presentes na amostra foi realizada por meio do método gravimétrico. Para garantir a precisão do método, utilizou-se um volume de amostra que, após evaporação, resultou em um resíduo seco entre 2,5 mg e 250 mg (American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, 2023)

Inicialmente, a amostra líquida foi transferida para uma cápsula de porcelana previamente tarada e pesada. Em seguida, o conjunto (cápsula + amostra) foi submetido à secagem em estufa a 103 ± 2 °C, durante um período de uma hora.

Após o aquecimento, a cápsula foi transferida para um dessecador, onde permaneceu por 30 minutos, permitindo o resfriamento à temperatura ambiente. Em seguida realizou-se a pesagem do conjunto. O procedimento de secagem e resfriamento foi repetido até obter massa constante, ou até que a variação entre duas pesagens sucessivas fosse inferior a 4 % da massa previamente registrada (American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, 2023)

A massa dos ST foi determinada conforme Equação 6:

$$ST \text{ (mg/L)} = \frac{(P_2 - P_1) * 1000000}{V_a} \quad (\text{Eq. 6})$$

P_1 representa a massa da cápsula vazia (g), P_2 corresponde à massa da cápsula contendo o resíduo seco (g), e V_a refere-se ao volume da amostra utilizado (mL).

3.4.7. Determinação dos Sólidos Dissolvidos (SD)

A quantificação dos SD do efluente analisado foi realizada por meio do método gravimétrico, o qual consiste em uma análise quantitativa que determina a massa de um componente em uma amostra através de processos de separação, filtração e pesagem (American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, 2023). Para maior precisão do método, recomenda-se o uso de um volume de amostra que resulte em resíduo seco entre 2,5 mg e 250 mg.

Inicialmente, a amostra foi submetida à filtração utilizando um filtro de fibra de vidro acoplado a um sistema de vácuo. Após a filtração, realizou-se a lavagem do material retido no filtro com duas alíquotas de 10 mL de água destilada, que também foram filtradas através do mesmo meio filtrante, assegurando a completa recuperação dos SD.

O filtrado obtido foi transferido para uma cápsula de porcelana previamente tarada e pesada. Este conjunto foi então levado à estufa e mantido a uma temperatura de 180 ± 2 °C, por uma hora, para promover a secagem e evaporação completa da água.

Em seguida, a cápsula foi colocada em um dessecador por um período de 30 minutos, permitindo seu resfriamento à temperatura ambiente. Após esse tempo,

procedeu-se à pesagem do conjunto. As etapas de secagem e resfriamento foram repetidas até obter massa constante, ou até que a variação entre duas pesagens consecutivas fosse inferior a 4 % da massa anterior.

A massa do SD foi determinada conforme Equação 7:

$$SD \text{ (mg/L)} = \frac{(P_2 - P_1) * 1000000}{V_a} \quad (\text{Eq. 7})$$

P_1 representa a massa da cápsula vazia (g), P_2 corresponde à massa da cápsula contendo o resíduo seco (g), e V_a indica o volume da amostra utilizada (mL).

3.4.8. Determinação dos Sólidos em Suspensão (SS_{usp})

A determinação dos SS_{usp} foi realizada por meio do método gravimétrico, utilizando filtração e pesagem (American Public Health Association, American Water Works Association e Water Environment Federation, 2023).

Inicialmente, um filtro de fibra de vidro e um vidro de relógio são submetidos à secagem em estufa a uma temperatura entre 103 e 105 °C, garantindo a eliminação de qualquer umidade residual. Em seguida, os materiais foram transferidos para um dessecador, onde permaneceram por 30 minutos para o resfriamento à temperatura ambiente. Após esse período, realizou-se a pesagem do filtro seco, registrando-se a massa obtida.

Para a precisão do método, recomenda-se utilizar um volume de amostra capaz de gerar um resíduo seco entre 2,5 mg e 250 mg. A amostra é então filtrada por meio do filtro de fibra de vidro previamente pesado, com o auxílio de um sistema a vácuo. Durante a filtração, é essencial lavar o material retido com duas porções de 10 mL de água destilada, que também devem ser filtradas através do mesmo filtro, assegurando a remoção de interferentes solúveis.

Após a filtração, o filtro contendo os resíduos foi cuidadosamente transferido para o vidro de relógio e levado à estufa, onde permaneceu no mínimo 1 hora a uma temperatura de 103 a 105 °C, promovendo a secagem completa do material. Na sequência, o conjunto foi resfriado em dessecador por 30 minutos e, posteriormente, pesado. O ciclo de secagem e resfriamento foi repetido até atingir massa constante, ou

até que a variação entre duas pesagens sucessivas fosse inferior a 4 % da massa anterior.

A massa dos SS_{usp} foi determinada conforme Equação 8:

$$SSusp \text{ (mg/L)} = \frac{(P2 - P1) * 1000.000}{mL \text{ da amostra}} \quad (\text{Eq. 8})$$

P2 representa a massa do filtro com resíduo seco, P1 corresponde a massa do filtro seco (g)

3.4.9. Determinação de Sólidos Sedimentares (SS_{edi})

A determinação dos resíduos sedimentáveis foi realizada por meio do método do cone de Imhoff. Esse procedimento baseia-se na sedimentação das partículas em suspensão presentes no efluente sob a ação da gravidade, sendo os resultados expressos em mL/L. A técnica é amplamente aplicada na análise de águas superficiais, despejos domésticos e industriais (Thode Filho et al., 2015)

Para a execução do ensaio, utilizou-se um cone de Imhoff com capacidade de 1 L e um bastão de vidro. Inicialmente, a amostra foi homogeneizada e transferida para o cone de Imhoff até a marca de 1 L. Em seguida, o cone permaneceu em repouso por 45 minutos, período necessário para a sedimentação parcial dos sólidos. Após esse tempo, um bastão de vidro foi cuidadosamente passado pelas paredes internas do cone, com o objetivo de desprender partículas aderidas, aguardando mais 15 minutos de repouso. Ao término de 1 hora, realizou-se a leitura direta do volume de sólidos sedimentados na escala graduada do cone.

3.4.10. Determinação de amônia, nitrato e nitrito

A concentração de amônia, nitrato e nitrito foi determinada por espectrofotometria, utilizando o equipamento multiparâmetro de bancada Hanna HI83099. O método baseia-se em reações colorimétricas específicas para cada íon, seguindo os protocolos dos reagentes fornecidos pelo fabricante. Cada espécie, ao reagir com seu reagente específico, originou uma coloração distinta: amônia apresentou

coloração amarela, nitrato resultou em âmbar e nitrito em marrom esverdeado. Cabe destacar que o fabricante não especificou a composição exata dos reagentes utilizados. As leituras espectrofotométricas foram realizadas nos comprimentos de onda de 420 nm, 525 nm e 575 nm, correspondentes, respectivamente, à amônia, nitrato e nitrito.

3.4.11. Determinação de óleos & graxas

Este método identifica a presença de óleos, graxas e demais compostos orgânicos, uma vez que não há solventes disponíveis capazes de dissolver seletivamente apenas esses materiais.

O método foi iniciado com 100 mL da amostra do efluente acidificado e foram transferidos para um funil de separação contendo 40 mL de éter de petróleo. (Carvalho, 2019). Após a separação das fases, a porção orgânica foi filtrada em papel de filtro com 1 g de sulfato de sódio, e o filtrado coletado em um béquer previamente seco e pesado. O processo de extração foi repetido com a fase aquosa, utilizando mais 40 mL de éter de petróleo, seguido de nova separação de fases, filtração com sulfato de sódio e coleta do filtrado no mesmo béquer. Em seguida, o funil e o papel de filtro foram lavados com 30 mL do solvente orgânico. Por fim, todo o solvente contido no béquer foi evaporado a 70 °C, determinando-se o teor de óleos e graxas pela massa residual remanescente após a evaporação (Equação 9).

$$\text{Óleos e graxas (mg/L)} = \frac{(M_2 - M_1) * 1000}{V} \quad (\text{Eq. 9})$$

M_1 representa a massa do béquer em (mg), M_2 corresponde à massa do béquer com resíduo em (mg), e V indica o volume da amostra utilizada (mL).

3.4.12. Determinação da condutividade

A condutividade elétrica é a capacidade de conduzir corrente elétrica e está diretamente relacionada com a presença de íons dissolvidos no efluente. Quanto maior for a concentração de íons, consequentemente será maior a condutividade iônica (Bottega, 2022).

O efluente foi analisado através do uso do condutivímetro TEC4-MP da Tecnal. Antes de iniciar a medição, o equipamento foi calibrado com uma solução padrão que apresentava uma condutividade de $146,9 \mu\text{S cm}^{-1}$, à temperatura ambiente de 25°C (American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2023).

3.4.13. Determinação turbidez

A turbidez é uma característica física onde representa o grau de interferência da passagem da luz por meio dela. É expressa por UNT (Unidade Nefelométricas de Turbidez – ou NTU em inglês). O equipamento usado para avaliar a turbidez do efluente foi o turbidímetro 2100Q da Hach, que é composto por um nefelômetro. Esse método nefelométrico fundamenta-se na comparação da intensidade de luz dispersa pela amostra com a intensidade da luz dispersa por uma suspensão padrão. A calibração do equipamento foi realizada com os padrões de 10, 20, 100 e 800 NTU (American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2023).

3.4.14. Determinação de cor real e cor aparente

A cor está relacionada com o grau de redução da intensidade que a luz sofre ao atravessar a amostra pela presença de sólidos orgânicos ou inorgânicos presentes dissolvidos. A cor aparente corresponde à coloração observada na amostra em seu estado bruto, ou seja, sem a remoção de partículas em suspensão por algum meio de filtração. Já a cor real é determinada após a completa remoção dessas partículas, refletindo unicamente a coloração proveniente de substâncias dissolvidas.

A cor pode variar de acordo com o pH, e quando a amostra apresentar concentrações altas de efluentes industriais deve se aplicar a diluição e utilizar espectrofotômetro para a determinação precisa.

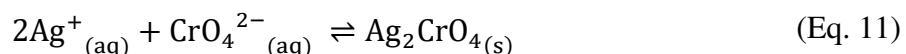
A análise para os parâmetros de cor real e aparente foi realizada por meio do método espectrofotométrico, utilizando um espectrofotômetro PHOTOMETER UV-1800, marca SHIMADZU, calibrado para leituras no comprimento de onda de 465 nm. Para a determinação da cor real, as amostras foram previamente filtradas em papel filtro

qualitativo (UNIFIL, faixa azul), garantindo a remoção das partículas em suspensão e permitindo a análise apenas das substâncias solúveis responsáveis pela coloração. Os resultados foram obtidos a partir da curva de calibração construída, cuja equação da reta é $y = 0,0003x + 0,0002$ ($R^2 = 1$) (Anexo II), a qual permitiu a conversão das leituras de absorbância em valores de concentração.

3.4.15. Determinação de cloreto

Para a determinação dos íons cloreto, utilizou-se o método argentométrico, com detecção visual do ponto de equivalência. Esse método consiste na titulação do efluente com uma solução padrão de nitrato de prata (AgNO_3) 0,0141 mol/L, na qual os íons Ag^+ reagem com os íons Cl^- presentes, formando um precipitado insolúvel de cloreto de prata (Equação 10).

Como indicador, adicionou-se cromato de potássio (K_2CrO_4), que permite a visualização do ponto final da titulação. Quando todos os íons Cl^- são precipitados, o primeiro excesso de íons Ag^+ reage com o cromato, formando um precipitado vermelho de cromato de prata (Ag_2CrO_4), sinalizando o término da titulação (Equação 11) (American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation, 2023).



A concentração de cloreto na amostra pode ser calculada a partir da Equação 12.

$$\text{Cl}^- (\text{g/L}) = \frac{(\text{V}_a - \text{V}_b) * \text{M} * 35,450}{\text{A}} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

V_a = volume da solução titulante gasto na amostra (L);

V_b = volume da solução titulante gasto no branco (L);

M = molaridade da solução titulante (nitrato de prata);

A = volume da amostra titulada (L).

3.5. Síntese e caracterização dos materiais adsorventes

3.5.1. Síntese do biocarvão a partir de caroço de açaí

O biocarvão utilizado, identificado pelo código BC50H300, foi produzido a partir de caroços de açaí no âmbito de um trabalho de doutorado em andamento no Laboratório de Eletroquímica e Tratamento de Efluentes (LAETE) pela pesquisa de Eduardo Ribeiro Marinho. Além dos caroços de açaí, essa pesquisa também emprega cascas de cupuaçu descartadas no Centro Comercial de Belém. A síntese do biocarvão envolve ativação química em meio ácido com ácido fosfórico (H_3PO_4) a 50 % por duas horas, seguida de carbonização térmica a 300 °C pelo mesmo período.

3.5.2. Caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise morfológica das amostras foi realizada por meio do MEV, aplicado tanto ao carvão ativado comercial quanto ao carvão ativado obtido a partir do caroço de açaí. Essa técnica é amplamente empregada para a caracterização da morfologia de materiais sólidos (Bispo, 2022).

O MEV utiliza feixes de elétrons em vez de luz visível, o que possibilita imagens com maior resolução. Essa superioridade se deve ao menor comprimento de onda dos elétrons, que, ao serem acelerados por tensões da ordem de 50 kV, podem atingir comprimentos de onda na faixa de 0,005 Å (angstroms), o que garante uma resolução significativamente superior à dos microscópios ópticos convencionais (Muniz, 2024).

3.6. Avaliação do processo de adsorção para tratamento do efluente

3.6.1. Influência da concentração de carvão ativado

Para avaliar a influência da concentração de carvão ativado comercial no processo de adsorção, foram utilizados 50 mL do efluente líquido com diferentes

dosagens do adsorvente: 0,5, 1, 2, 3, 4 e 5 g/L. As misturas foram submetidas à agitação mecânica a 250 rpm durante 5 minutos e, em seguida, filtradas com papel filtro qualitativo (UNIFIL, faixa azul) para posterior análise. A eficiência do tratamento foi monitorada por meio das análises de cor real, demanda química de oxigênio (DQO) e condutividade iônica. O desempenho do adsorvente foi avaliado em pH 3,7 a temperatura de 25 ± 2 °C.

3.6.2. Influência do tempo de contato com carvão ativado

Nessa etapa, avaliou-se o efeito do tempo de contato entre o efluente e o carvão ativado a temperatura de 25 ± 2 °C em pH 3,7. Para isso, foram feitos experimentos com 50 mL do efluente contendo 3 g/L do carvão ativado comercial. As amostras foram agitadas a 250 rpm por períodos de 5, 10, 20, 40, 60 e 80 minutos. Após cada intervalo de tempo, as amostras foram filtradas com papel filtro qualitativo (UNIFIL, faixa azul) e analisadas quanto a cor real e DQO.

3.6.3. Influência da adsorção sequencial com carvão ativado

A eficiência do carvão ativado comercial foi avaliada por meio de um processo de adsorção sequencial aplicado a um mesmo volume de efluente, sendo as condições de operação estabelecidas em 25 ± 2 °C e em pH 3,7 (natural da matriz do efluente utilizado).

Inicialmente, foram utilizados 150 mL da amostra, aos quais se adicionou carvão ativado na quantidade necessária para atingir a concentração de 1 g/L. A mistura foi mantida sob agitação controlada por 5 minutos e, em seguida, a amostra foi filtrada em papel filtro qualitativo (UNIFIL, faixa azul), por gravidade. Do filtrado, retirou-se uma alíquota de 50 mL para análise, enquanto o volume remanescente 100 mL foi mantido para a continuidade do processo.

No segundo ciclo, ao volume de 100 mL previamente filtrado, adicionou-se carvão ativado suficiente para atingir a concentração de 1 g/L. Após agitação por 5 minutos, a amostra foi novamente filtrada em papel filtro qualitativo, sendo retirada uma alíquota de 50 mL para análise e preservando-se 50 mL para o ciclo subsequente.

Por fim, no terceiro ciclo, aos 50 mL restantes adicionou-se carvão ativado na quantidade necessária para atingir a concentração de 1 g/L. A suspensão foi mantida sob agitação por 5 minutos e, em seguida, filtrada para obtenção do volume destinado às análises.

As alíquotas coletadas em cada etapa foram analisadas quanto aos parâmetros de interesse, especificamente cor real e DQO.

3.6.4. Avaliação do uso de biocarvão produzido a partir de caroço de açaí

Esta etapa foi realizada com o intuito de comparar a eficiência do biocarvão produzido a partir de caroço de açaí com a do carvão ativado comercial. Para isso, aplicou-se o mesmo procedimento sequencial descrito no item 3.6.3, substituindo o carvão ativado pelo biocarvão.

3.6.5. Avaliação da síntese do biocarvão e carvão ativado comercial por meio do MEV

A análise por MEV foi empregada para comparar a estrutura do carvão ativado comercial com a do biocarvão obtido a partir do caroço de açaí. Essa caracterização possibilitou avaliar a morfologia de ambos os materiais e verificar de que forma tais características podem influenciar em seu desempenho.

Assim, a MEV fornece informações fundamentais para interpretar os resultados experimentais e relacionar a estrutura física à eficiência na remoção de cor real e DQO.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do efluente gerado no lavador de gases

Primeiramente foi feita a caracterização físico-química do efluente para entender a sua composição e complexidade (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização físico-química efluente gerado no lavador de gases.

Parâmetro	Valores
pH	3,7 ± 0,1
Alcalinidade (mg/L)	< LQ (5,0)
Condutividade (µS/cm)	232 ± 1
Demanda química de oxigênio - DQO (mg O ₂ /L)	6875 ± 321
Demanda bioquímica de oxigênio - DBO (mg O ₂ /L)	180 ± 0
Carbono total dissolvido - CTD (mg/L)	1621 ± 9
Carbono inorgânico dissolvido - CID (mg/L)	1 ± 0
Carbono orgânico dissolvido - COD (mg/L)	1620 ± 9
Óleos & graxas (mg/L)	393 ± 83
Sólidos totais (mg/L)	1720 ± 7
Sólidos dissolvidos (mg/L)	1714 ± 2
Sólidos em suspensão (mg/L)	16 ± 1
Sólidos sedimentáveis (mL/L/h)	< 0,1
Turbidez (NTU)	150 ± 1
Cor aparente (mg/L Pt/Co)	2030 ± 22
Cor real (mg/L Pt/Co)	1399 ± 49
Amônia (mg/L)	537 ± 30
Nitrito (mg/L)	25 ± 6
Nitrato (mg/L)	< LQ (0,5)
Cloreto (mg/L)	< LQ (2,0)

Fonte: O autor, 2025

Baseado nos resultados apresentados na Tabela 1, é possível observar pH de 3,7, caracterizando um meio ácido, condição que inviabiliza seu descarte direto em corpos hídricos. A Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece que o intervalo permitido para lançamento de efluentes deve estar entre pH 5,0 e 9,0, sendo necessário uma etapa prévia de neutralização para o descarte adequado.

A elevada acidez no efluente, representada pelo baixo valor de pH (3,7) (Tabela 1) pode estar relacionada à presença de ácidos orgânicos, compostos fenólicos e subprodutos da degradação térmica da biomassa durante a gaseificação de serragem de MDF (Liu, 2020). O meio fortemente ácido justifica o baixo valor de alcalinidade ($< LQ = 5 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) (Tabela 1). Valores abaixo de $100 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ são classificados como pouco eficazes no controle de variações de pH, enquanto concentrações entre 100 e $200 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ já conferem proteção satisfatória (Montana, 2019).

Também pode ser observado que o efluente apresenta baixa a moderada concentração de sais dissolvidos pelo valor de condutividade iônica obtido ($232 \mu\text{S cm}^{-1}$, Tabela 1), visto que a água potável apresenta condutividade entre 50 e $500 \mu\text{S/cm}$, enquanto águas salinas possuem condutividade superiores a $50.000 \mu\text{S/cm}$. De acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005 a condutividade iônica pode ser um indicador indireto de poluição por sais.

Em termos de matéria orgânica, é possível observar que o efluente apresenta alta carga orgânica dada pelos valores de DQO ($6875 \pm 321 \text{ mg/L}$) e COD ($1620 \pm 9 \text{ mg/L}$), Tabela 1. Também pode ser observado que a fração biodegradável da matéria orgânica é baixa, devido ao baixo valor de DBO ($180 \pm 0 \text{ mg/L}$), Tabela 1. Isso pode ser reforçado considerando a razão DBO/DQO para o efluente (0,026), valor muito inferior ao limite de 0,2 considerado indicativo de biodegradabilidade (Arques, 2007). Assim, o efluente apresenta menor eficiência a tratamentos biológicos convencionais, demandando processos físico-químicos ou tecnologias avançadas, como adsorção em carvão ativado e processos oxidativos avançados para a remoção ou destruição do conteúdo orgânico (Arques, 2007). Também é importante destacar que o valor da análise CTD ($1620 \pm 9 \text{ mg/L}$) foi igual ao de COD devido ao baixo valor de pH do efluente (3,7), visto que nestas condições não há praticamente a existência de carbonatos/bicarbonatos, dado que não foi detectado CID. Isso corrobora com o baixo valor de alcalinidade ($< LQ = 5 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$).

Em paralelo, foi observado que parte do conteúdo orgânico presente no efluente se deve a presença de óleos e graxas (392 ± 83 mg/L, Tabela 1), valor que é superior aos limites legais (20 mg/L para óleos minerais e 50 mg/L para óleos vegetais ou gorduras animais), estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 para descarte do efluentes em corpos hídricos. A presença de óleos e graxas no efluente é um fenômeno esperado, visto que durante o processo de gaseificação da biomassa ocorrem reações de degradação térmica que geram subprodutos como alcatrões, ceras, frações oleosas e compostos fenólicos. Esses compostos, ao passarem pelo sistema de resfriamento e lavagem dos gases, podem se condensar e ser transferidos para a fase líquida, elevando a concentração de óleos e graxas no efluente (Silva; Silva; Macedo 2020).

Também pode ser observado altos valores de ST (1735 ± 7 mg/L), sendo a maioria deles SD (1714 ± 2 mg/L), visto que o valor de SS_{usp} foi de apenas 16 ± 0 mg/L e de SS_{edi} foi de 0,1 mL/L (Tabela 1). Tais resultados mostram a eficiência dos ciclones utilizados no processo de gaseificação para a retenção do material particulado. E, dada a elevada concentração de sólidos dissolvidos, a adsorção em carvão ativado visando a remoção de compostos solúveis, como ácidos orgânicos e fenólicos, comumente encontrados em efluentes de processos termoquímicos (Ahmed; Hameed 2020), pode ser uma alternativa promissora para tratamento desse efluente gerado.

Os valores das análises de turbidez (150 ± 1 NTU), e cor aparente (2030 ± 22 mg/L Pt-Co) e cor real (1399 ± 49 mg/L Pt-Co) (Tabela 1), corroboram com os resultados de ST, SD, SS_{usp} e SS_{edi}, ou seja, a turbidez e a cor do efluente se deve majoritariamente a substâncias dissolvidas e, muito pouco devido a partículas em suspensão.

Embora não existam limites estabelecidos pela legislação brasileira para turbidez e cor em efluentes industriais ou domésticos, os valores encontrados são considerados elevados. Para fins comparativos, recomenda-se que a turbidez da água potável seja inferior a 5 NTU (ONU, 2022), enquanto o limite de cor aparente para consumo humano é de até 15 mg Pt-Co/L, conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005. Assim, ainda que tais parâmetros não se apliquem diretamente a efluentes, a comparação evidencia a elevada carga de substâncias dissolvidas presentes no efluente analisado.

Em relação à presença de substâncias nitrogenadas, é possível observar que, devido às condições redutoras empregadas no processo de gaseificação, o nitrogênio se

encontra majoritariamente como amônia (NH_3 , $537 \pm 30 \text{ mg/L}$) e em menor proporção como nitrito ($25 \pm 6 \text{ mg/L}$) (Tabela 1). Entretanto, os valores obtidos para ambos os compostos encontram-se significativamente acima dos limites estabelecidos pela legislação ambiental brasileira (Resolução CONAMA nº 357/2005). Por outro lado, a concentração de nitrato ficou abaixo do limite de quantificação do equipamento ($< \text{LQ} = 0,5 \text{ mg/L}$) (Tabela 1), em razão das condições redutoras do meio, que favorecem a formação de compostos nitrogenados nas formas reduzidas.

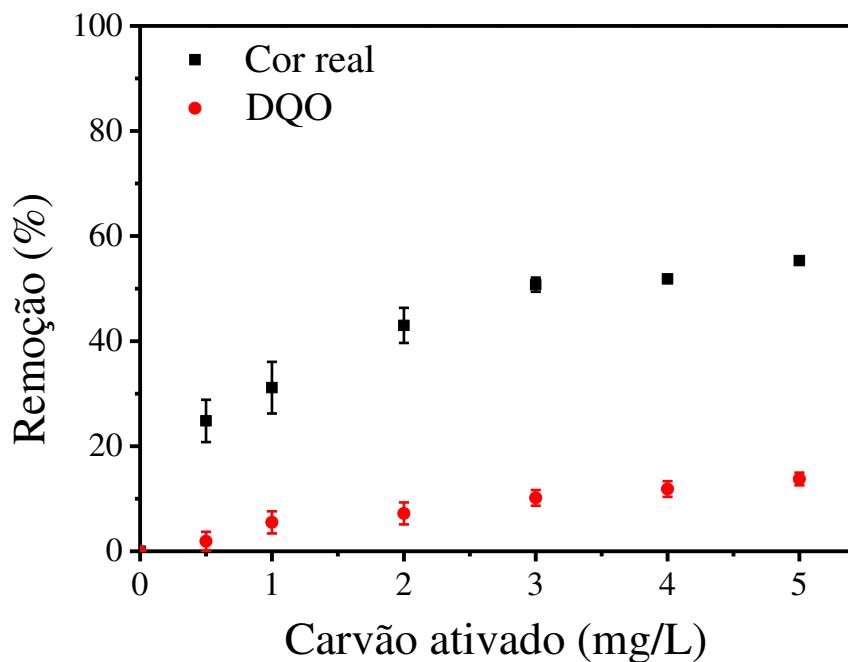
4.2. Influência da concentração de carvão ativado comercial

A influência da concentração de carvão ativado no processo de adsorção foi avaliada utilizando tempo fixo de agitação de 5 minutos (Figura 2). Pode ser observado que a eficiência de remoção de cor real e DQO aumentou com o aumento da concentração de carvão ativado e atingiu um máximo em 3 g/L , permanecendo praticamente constante para as concentrações de 4 e 5 g/L (Figura 2). Isso pode ser provavelmente associada à limitação de difusão e ao equilíbrio de adsorção já estabelecido entre fase líquida e sólida (Aldabagh; Khalid 2025). Dessa forma, embora maiores dosagens ampliem a capacidade de remoção, o ganho negativo de eficiência tende a se estabilizar.

Assim, na melhor concentração de carvão ativado (3 g/L) foi possível atingir uma remoção média de cor real de $51 \pm 1 \%$ e de DQO de apenas $10 \pm 1 \%$ (Figura 2). Em paralelo com essas análises, também foi monitorada a condutividade, sendo mantida igual ao valor inicial ($232 \pm 0 \mu\text{S/cm}$) para os testes feitos com diferentes concentrações de carvão ativado (dados não apresentados na Figura 2 por permanecer inalterado). Tais resultados mostram que o material adsorvente (carvão ativado) não é eficiente para remoção de compostos iônicos; somente para compostos apolares. Assim, é possível inferir que a maioria dos compostos orgânicos que contém grupos cromóforos e que dão a cor foram removidos durante essa baixa remoção do conteúdo orgânico representado pela análise de DQO (Figura 2). Esse comportamento pode ser explicado pela composição química do efluente, visto que a presença de anéis aromáticos nos compostos orgânicos permitem interações fortes do tipo $\pi-\pi$ com as estruturas π dos anéis aromáticos do material carbonáceo, um processo de atração entre as nuvens eletrônicas desses anéis (Paralovo; Martins; Alves 2022). Também é possível estimar

que a maioria da fração orgânica dissolvida no efluente tenha um maior caráter polar, proporcionado menor interação com o carvão e, consequentemente, baixa eficiência de remoção (kovalova, et al., 2013).

Figura 2. Influência da concentração de carvão ativado na remoção de cor real e DQO durante tempo de exposição de 5 min. Condições iniciais: pH = 3,7 e T= 25 ± 2 °C.



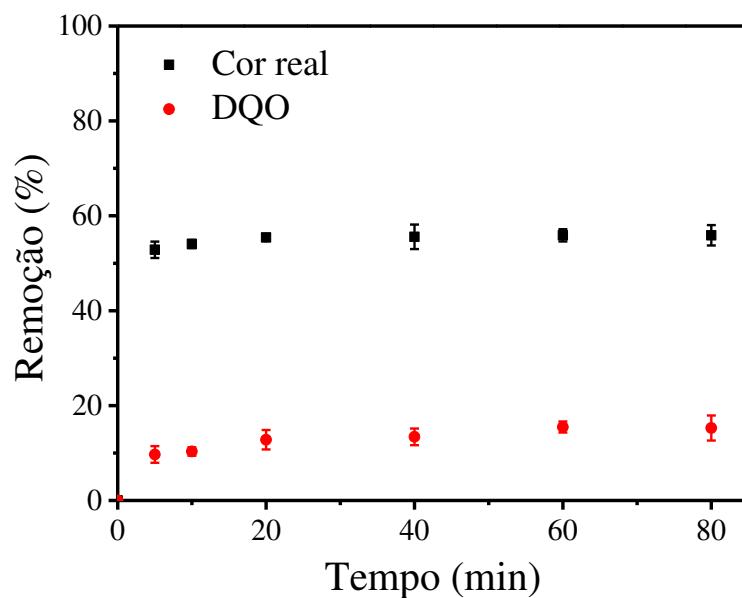
Fonte: O autor, 2025.

4.3. Influência do tempo de contato

Dada a baixa remoção de DQO para as diferentes concentrações de carvão ativado (entre 0,5 e 5,0 g/L) para um tempo de exposição de 5 min, e considerando que este tempo pode estar afetando a eficiência do processo, novos experimentos foram feitos na melhor concentração de carvão ativado (3 g/L), variando o tempo de exposição entre 5 e 80 min (Figura 3). No entanto, verificou-se que o aumento do tempo não promoveu melhorias significativas na eficiência de remoção de cor real e DQO (Figura 3). Esses dados indicam que, nas condições testadas, o sistema atinge rapidamente o equilíbrio de adsorção, e o prolongamento do tempo de contato não promove ganhos expressivos na remoção de matéria orgânica (Mandzuk et al, 2023).

A baixa remoção de DQO observada pode ser explicada pela predominância de compostos orgânicos polares e solúveis, que apresentam baixa afinidade pelas superfícies hidrofóbicas do carvão ativado, cujo mecanismo de adsorção é mais eficiente para compostos apolares (Hang et al, 2025). Quanto à cor, a estabilização da remoção se deve a fração orgânica dissolvida polar que permanece solúvel no meio.

Figura 3. Influência do tempo de exposição na remoção de cor real e DQO na presença de 3 g/L de carvão ativado. Condições iniciais: pH = 3,7 e T= 25 ± 2 °C.



Fonte: O autor, 2025.

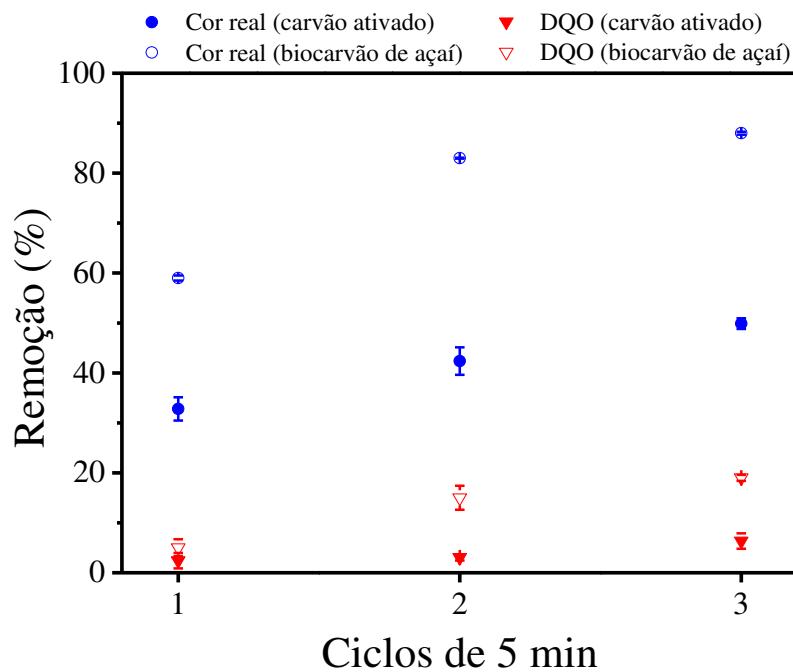
4.4. Efeito da adsorção sequencial e de diferentes materiais adsorventes (carvão ativado x biocarvão de açaí)

Diante dos resultados obtidos para as diferentes concentrações de carvão ativado e tempos de exposição, e visando maximizar a eficiência de remoção dos parâmetros avaliados, optou-se pela aplicação da adsorção em ciclos sucessivos. O objetivo foi verificar se o fracionamento da dose apresentaria maior eficiência em comparação à aplicação em dose única (Nichols, 2025) (Figura 4). Além disso, embora o carvão ativado seja amplamente utilizado como adsorvente, a busca por alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis tem impulsionado pesquisas voltadas ao

desenvolvimento de novos materiais, como o biocarvão, também conhecido como biochar (Figueiredo et al., 2024).

Nesse contexto, foram conduzidos experimentos comparativos utilizando ambos os materiais adsorventes. Para avaliar sua eficiência, a concentração considerada ótima (3 g/L) foi fracionada em três ciclos consecutivos de 1 g/L cada. Em cada ciclo, adotou-se um tempo de agitação de 5 min, com retirada de uma alíquota da mesma amostra após cada etapa (Figura 4) e adição de novo carvão ativado entre os ciclos.

Figura 4. Influência de três ciclos sucessivos (1 g/L de cada material adsorvente por ciclo, totalizando 3 g/L) de aplicação de carvão ativado (símbolos fechados) e biocarvão de açaí (símbolos abertos) na remoção de cor real e DQO durante um tempo de exposição de 5 min/ciclo. Condições iniciais: pH= 3,7 e a T= 25 ± 2 °C.

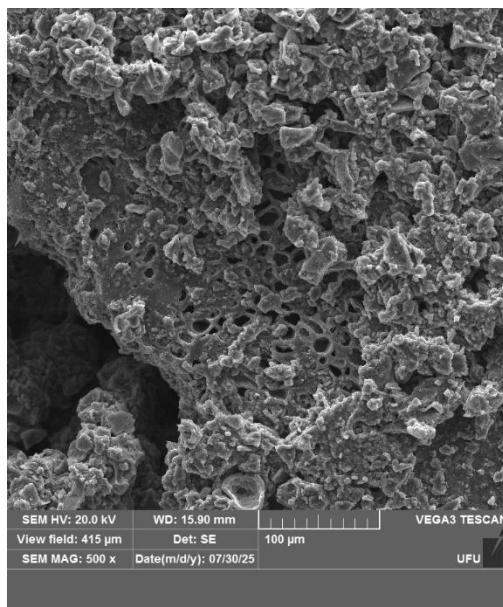


Fonte: O autor, 2025

Conforme pode ser observado na Figura 4, a adsorção sequencial de 1 g/L por ciclo totalizando 3 g/L, aumentou a remoção de cor real de 33 % (primeiro ciclo) para 50 % (terceiro ciclo). Contudo, não houve nenhuma melhora na remoção de cor quando comparado ao experimento feito com o uso único de 3 g/L de carvão ativado (Figura 3). Isso reforça a hipótese prévia sobre o caráter polar da fração orgânica dissolvida, visto

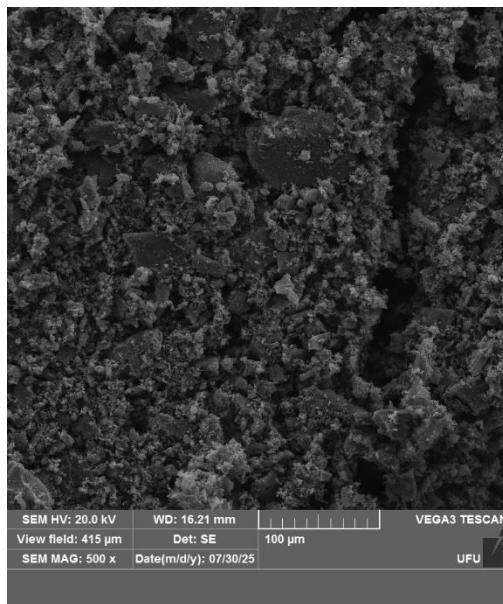
que a remoção de DQO foi inferior a 6 % (Figura 4). Assim, a aplicação contínua, conforme ilustrado na Figura 3, atingiu eficiência semelhante de forma mais simples e menos complexa. Comparando os dois materiais adsorventes, é possível observar que o biocarvão de açaí apresentou maior eficiência na remoção de cor ($88 \pm 0,3 \%$) e DQO ($19 \pm 0,6 \%$) quando comparado ao carvão ativado (cor: $50 \pm 1,0 \%$ e DQO: $6 \pm 2 \%$) (Figura 4). Com a finalidade de caracterizar morfologicamente cada material, foi realizado análise de MEV. As micrografias, na escala de $500 \mu\text{m}$ foi obtida para o biocarvão de açaí e carvão ativados estão apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Figura 5. Micrografias da análise do MEV para o biocarvão ativado de caroço de açaí com ampliação de 500x.



Fonte: Autor, 2025

Figura 6. Micrografias da análise do MEV para o carvão ativado comercial com ampliação de 500x.



Fonte: Autor, 2025

Analizando a Figura 5, observa-se que o biocarvão apresenta uma estrutura irregular e heterogênea, com tamanhos variados, fissuras e cavidades interconectadas. Em contraste, o carvão ativado comercial (Figura 6) exibe uma superfície mais homogênea, característica típica de materiais submetidos a processos controlados de ativação.

Essa diferença morfológica entre os dois materiais adsorventes pode ajudar a explicar os distintos desempenhos observados nos testes de adsorção. O biocarvão, devido à sua estrutura irregular e tendência mesoporosa, favoreceu maior remoção de cor real e DQO, possibilitando melhor interação com moléculas cromóforas de maior porte presentes no efluente, como os compostos aromáticos complexos responsáveis pela coloração (Figura 4) (Silva, 2023).

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou a importância da caracterização do efluente gerado durante a lavagem dos gases oriundos do processo de gaseificação de resíduos de serragem de MDF para identificação da sua composição e potencial contaminante. E, para escolher o processo a ser empregado no tratamento do efluente visando o seu reuso no processo industrial.

Embora nos testes feitos com os materiais adsorventes avaliados (carvão ativado e biocarvão) não foi possível atingir eficiências expressivas de remoção de DQO, esse trabalho serviu para mostrar a necessidade de estudos futuros avaliando outros parâmetros operacionais que podem afetar a eficiência, tais como: determinação do ponto de carga zero dos materiais adsorventes, avaliação da remoção de DQO em diferentes valores de pH do efluente, testes com os materiais adsorventes efetuando-se previamente a etapa de pré-ativação por meio de processo térmico a 800 °C ou com água quente para melhor a disponibilidade dos sítios ativos, ensaios para entender se a remoção do conteúdo orgânico está ocorrendo por adsorção física ou química e uso de outros materiais adsorventes.

REFERENCIAS

AHMED, M. J.; HAMEED, B. H. Adsorção de fenóis de soluções aquosas usando carvão ativado: uma revisão. *Revista de Produção Mais Limpa*, v. 246, p. 118–859, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140066>

ALDABAGH, I. S.; KHAZZAL, H. Comprehensive characterization for efficient adsorption of Tetracycline from wastewater from the synthesis of nanoparticles by batch and fluidized bed column. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 13, n. 3, p. 107–118, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100606>

ANA – Agência Nacional de Águas. Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos 2013. Brasília: ANA, 2013. Disponível em: ANA biblioteca digital. Acesso em: 26 set. 2025.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23. ed. Washington, DC: APHA, 2023.

ARQUES, A.; AMAT, A. M.; GARCÍA-RIPOLL, A.; VICENTE, R. Detoxification and/or increase of the biodegradability of aqueous solutions of dimethoate by means of solar photocatalysis. *Journal of Hazardous Materials*, v. 146, n. 3, p. 447–452, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.046>

BELLVER-DOMINGO, U. M.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F. Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Journal of Environmental Management*, v. 305, p. 114416, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>

BISPO, A. M. Avaliação dos parâmetros de pirólise na capacidade de adsorção pelo biocarvão obtido da torta de cártamo. 2022. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química do Petróleo) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

BOTTEGA, E. L.; OLIVEIRA, Z. B. DE; AMADO, T. J. C.; ABREU, B. C. R. DE. Mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo por diferentes equipamentos. *Revista Cultura Agronômica*, Ilha Solteira, v. 31, n. 1, p. 12–27, 2022. DOI: <https://doi.org/10.32929/2446-8355.2022v31n1p12-27>

CARVALHO, R. G.; KRUK, N. SMAHA; KAWACHI, E. Y.; QUEIROZ, P. I. B. Um método de ensaio para determinação da concentração de óleo em amostras de águas contaminadas com óleos e graxas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 515–523, maio–jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019127950>

CARDOSO JÚNIOR, C. D. Uso agrícola e florestal do biochar: estado da arte e pesquisas futuras. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 2, p. e55711225999, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25999>

CLAUDINO, A. Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) –

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/86346> Acesso em: 26 set. 2025.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58–63, 18 mar. 2005.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 393, de 8 de agosto de 2007. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 154, p. 100–101, 10 ago. 2007.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 maio 2011.

FARIA, A. J. G.; RUFINI, M.; LEITE, A. A.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H. G.; GUILHERME, L. R. G.; MELO, L. C. A. Elemental analysis of biochar-based fertilizers via portable X-ray fluorescence spectrometry. *Environmental Technology & Innovation*, v. 23, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101788>

FERNANDES DE SOUSA MOURA, L.; MARQUES, J. J.; FREITAS, J. A. Adsorção de dióxido de carbono utilizando o biochar produzido a partir de sementes de mangaba (*Hancornia speciosa*). *Scientia Plena*, v. 14, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2018.034202>

FERREIRA, S. D. Produção de gás redutor através da gaseificação do biochar produzido a partir da conversão termoquímica de biomassa para fins siderúrgicos. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10183/205855> >. Acesso em: 26 set. 2025.

FIGUEIREDO, E. S.; BORGES, M. DE S.; SANTOS, J. R.; SCAPIN, E. Uso de biocarvões metalizados oriundos de biomassa residual da Amazônia Legal na remoção de Cr(VI) em águas. *Revista Desafios*, v. 11, n. 2, p. 1–14, 2024. Disponível em: < <https://sistemas.uff.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/21035> >. Acesso em: 26 set. 2025.

GAIO, S. S. M. Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade económica. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: ProQuest Dissertations & Theses < <http://hdl.handle.net/10451/26066> >. Acesso em: 26 set. 2025.

GONÇALVES, B. R. Tratamento de efluente da produção de biodiesel utilizando processos físico-químicos e reações de Fenton. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2016.136>

GUILHEN, S. N. Síntese e caracterização de biocarvão obtido a partir do resíduo de coco de macaúba para remoção de urânio de soluções aquosas. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.85.2018.tde-13092018-144036>

HAO, Z., CASPARI, A., SCHWEIDTMANN, A. M., VAUPEL, Y., LAPKIN, A. A., MHAMDI, A. Efficient hybrid multiobjective optimization of pressure swing adsorption. *Chemical Engineering Journal*, v. 423, p. 130248, 2021. doi:10.1016/j.cej.2021.130248

HANG, W.; SUN, J.; ZHAO, R.; CHEN, H.; LI, J. Selective adsorption of VOCs/water vapor on activated carbon: The role of adsorbent and VOC molecular polarity, *Separations*, v. 12, n. 4, p. 86, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/separations12040086>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Regiões de influência das cidades: 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2008. ISBN 9788524040382. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv40677.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2025.

KOVALOVA, L., KNAPPE, DRU, LEHNBERG, K. Removal of highly polar micropollutants from wastewater by powdered activated carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, p. 3607–3615, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1432-9>

KUMAR, S.; SINGH, R.; SHARMA, A. Biochar as a multi-action substance used to improve soil properties. *Agriculture*, v. 14, n. 12, p. 2165, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/12/2165>

LIMA, G. SOUZA. O uso do carvão ativado para tratamento da água cinza. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Cajazeiras, 2016. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/8141>>. Acesso em: 26 set. 2025.

LIU, Z.; DENG, Y.; LIU, Y.; LI, B. Characteristics and treatment of wastewater from biomass gasification: A review. *Chemosphere*, v. 251, p. 126365, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126365>

MARINHO, E. R. Síntese de carvão de açaí. Doutorado em andamento. Grupo de pesquisa LAETE – Laboratório de Eletroquímica e Tratamentos Especiais, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 maio 2021. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>. Acesso em: 26 set. 2025.

MOURA, L. F. S.; MARQUES, J. J.; FREITAS, J. A. Adsorção de dióxido de carbono utilizando o biochar produzido a partir de sementes de mangaba (*Hancornia speciosa*). *Scientia Plena*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2018.034202>

MUNIZ, C. R.; LIMA, J. R.; ROSSETTI, A. G. Utilização da Microscopia Eletrônica de Varredura na detecção de matérias estranhas em águas envasadas. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, São Paulo, v. 83, p. 1–9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.53393/rial.2024.v.83.40274>

NASCIMENTO, R. FERREIRA; LIMA, A. C. ALVES; VIDAL, C. BASTOS; MELO, D. QUADROS; CABRAL, R. G. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271>>. Acesso em: 26 set. 2025.

NICHOLS, L. *Organic Chemistry Laboratory Techniques*. LibreTexts. Disponível em: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Organic_Chemistry_Lab_Techniques_\(Nichols\)/04:_Extraction/4.05:_Extraction_Theory](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Organic_Chemistry_Lab_Techniques_(Nichols)/04:_Extraction/4.05:_Extraction_Theory)>. Acesso em: 26 set. 2025.

OLIVEIRA, L. R. Remoção de alumínio em sistema contínuo por adsorção em coluna de leito fixo com carvão ativado. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2014.13>

ONU-ÁGUA. Resumo da atualização de progresso de 2021: ODS 6 – água e saneamento para todos. Disponível em: <https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021a.pdf>. Acesso em: 26 set. 2025.

PARALOVO, J. L.; MARTINS, R. L.; ALVES, A. A. R. Mudança de paradigma da regra do octeto: proposta da “regra do novo olhar” sobre as ligações químicas: paradigm shift from the octet rule: proposal of the "new look rule" on chemical bonds. *Revista Contemporânea*, v. 2, n. 4, p. 153–181, 2022. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV2N4-010>

PINHEIRO, L. R.; DINIZ, B. R. S.; LEMOS, R. S. S.; RICCI, B. C.; ANDRADE, L. H. Avaliação de carvão ativado produzido a partir do caroço de açaí como adsorvente aplicado à remoção de ibuprofeno. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 11, n. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.9771/gesta.v0i2.52106>

RAASCH, L. B.; SÁ, Í. P.; SANTANA, G. M. Adsorção de chumbo (II) em solução aquosa usando carvão ativado do caroço da manga (Mangifera indica L.). *Revista Matéria*, v. 29, n. 4, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0219>

SCHULZ, F.; MOLZ, C. H.; MIRANDA, L. A. S.; PIRES, A. C. P. Avaliação metodológica na determinação de DBO5 por respirometria e luminescência. IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 2014. <<https://www.abes-rs.org.br/qualidade2014/trabalhos/id982.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2025.

SIDDIQUI, S. Unlocking the environmental potential of biochar: production, applications, and limitations. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 9, 1569941, 4 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1569941>

SILVA, A. M.; SILVA, M. T.; MACEDO, E. N. Remoção do alcatrão de correntes de gaseificação de biomassa: processos e catalisadores. *Química Nova*, v. 43, n. 2, p. 229–243, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140110>

SILVA, P. H. N. Caracterização e aplicação de biocarvão obtido a partir do caroço do açaí para a conversão de óleo de palma. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Bacharelado) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. < <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/53644> >. Acesso em: 26 set. 2025.

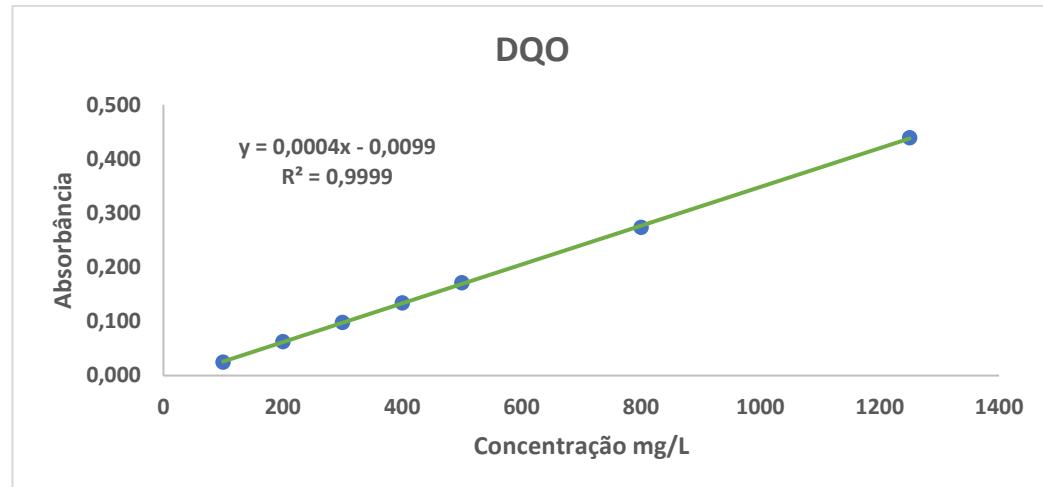
THODE FILHO, S.; COUTO, H. J. B.; LEMOS, S. D. C.; AVELINO, E. R.; MARQUES, M. R. C. Determinação de sólidos sedimentáveis: um estudo preliminar sobre biomassas residuais de café e ervas-mate comerciais. *Ciência e Natura*, v. 37, n. 3, p. 673–677, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X16824>

UNGUREANU, N.; VLĂDUTĂ, N.-V.; BIRIŞ, S.-Ş.; IONESCU, M.; GHEORGHIȚĂ, N.-E. Municipal solid waste gasification: Technologies, process parameters, and sustainable valorization of by-products in a circular economy. *Sustainability*, v. 17, n. 15, p. 6704, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17156704>

WESTPHALEN, A. P. C.; BENETTI, A. D. Utilização de carvão ativado biológico para o tratamento de água para consumo humano. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 425–436, jul./set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016143108>

ANEXOS

ANEXO I: Curva analítica para DQO.



ANEXO II: Curva analítica para cor real.

