

ECONOMIA CIRCULAR NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL: CATALISADOR SÓLIDO ÁCIDO DERIVADO DE HIDROCARVÃO APLICADO NA SÍNTESE DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE ANDIROBA

Klemerson L. da Silva¹; Thaissa S. Ribeiro²; Izadora de A. Sobrinho⁴; Beatriz dos S. Silva³; Orlando S. Neto²; Matheus A. Gonçalves²; Rafael V. Rodrigues¹; Deborah da C. Fonseca⁴; Vicente da S. Lima⁵; Leyvison R.V. da Conceição^{1,2,4}

¹Universidade Federal do Pará, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Laboratório de Catálise e Oleoquímica (klemersonluizsilva@gmail.com)

²Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Química, Laboratório de Catálise e Oleoquímica

³Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Laboratório de Catálise e Oleoquímica

⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - Campus Belém, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Laboratório de Catálise e Oleoquímica

⁵Universidade Federal do Pará, Instituto de Ciências Biológicas, Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, Laboratório de Óleos da Amazônia

Palavras-Chave: Biomassa residual, ésteres metílicos, catálise heterogênea.

Introdução

O crescimento econômico e populacional intensificou o uso de combustíveis fósseis, fonte predominante e de baixo custo, mas responsável por sérios impactos ambientais, como a emissão de gases poluentes e o agravamento do efeito estufa (Borah et al., 2019; Chong et al., 2021). Assim, a busca por combustíveis renováveis representa uma estratégia alinhada às demandas globais por transição energética sustentável, com destaque para o biodiesel, por ser um combustível renovável, obtido via transesterificação ou esterificação de triglicerídeos e ácidos graxos livres, podendo utilizar matérias-primas variadas, incluindo óleos vegetais de menor qualidade e gorduras animais (Munyetwali et al., 2022). Nesse cenário, alinhar o desenvolvimento científico aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) torna-se fundamental, sobretudo aos que tratam da garantia de energia limpa e acessível (ODS 7), da produção e consumo responsáveis (ODS 12) e da ação contra a mudança global do clima (ODS 13) (ONU, 2015).

Os catalisadores utilizados na síntese de biodiesel podem ser homogêneos ou heterogêneos, com características ácidas, básicas ou enzimáticas (Ao et al., 2024). Industrialmente, predominam os catalisadores homogêneos, principalmente pela alta atividade catalítica e pelas condições reacionais mais brandas. No entanto, apresentam limitações, como a exigência de matérias-primas refinadas, necessidade de neutralização ácida após a reação e elevada geração de resíduos, aumentando custos e impactos ambientais. Além disso, matérias-primas não refinadas apresentam alto percentual de ácidos graxos livres (AGL), como o óleo de andiroba, o que impossibilita o uso de catalisadores básicos devido à ocorrência de reações indesejadas, como a saponificação (Gonçalves et al.; Mares et al., 2021). Em contrapartida, catalisadores heterogêneos ácidos representam uma alternativa eficiente, sobretudo para matérias-primas de baixo custo. Eles não são corrosivos, podem ser recuperados por filtração ou centrifugação e oferecem menor dificuldade de descarte (Gonçalves et al., 2024). Outra vantagem é a possibilidade de reutilização, o que torna o processo mais sustentável e economicamente atrativo.

Para ampliar a eficiência e a reutilização dos catalisadores heterogêneos, torna-se essencial o uso de suportes adequados. Nesse sentido, o carvão ativado derivado de biomassa residual surge como opção promissora, devido à alta porosidade, excelente estabilidade em meios ácidos ou básicos e grande área superficial específica (Ribeiro et al., 2024). Esse material

pode ser obtido por pirólise, carbonização, liquefação hidrotérmica, torrefação ou carbonização hidrotérmica. As propriedades físico-químicas resultantes variam conforme a biomassa de origem e os processos empregados de obtenção, funcionalização e ativação (Cao et al., 2017; Low et al., 2021).

Tradicionalmente, a produção de carvão ativado ocorre por pirólise em atmosfera inerte. Entretanto, esse processo requer prévia secagem rigorosa da biomassa, o que constitui desvantagem, dado o elevado teor de umidade natural desses materiais. Como alternativa, a carbonização hidrotérmica (HTC) oferece vantagens, pois dispensa a secagem, sendo conduzida em água sob condições de pressão autógena (2–10 MPa) em reator fechado. Nessa etapa, componentes lignocelulósicos sofrem dissolução e transformações químicas, resultando na formação de hidrocarvão, bio-óleo e gases (He et al., 2013; Kalderis et al., 2014; Fang et al., 2018). Além disso, o hidrocarvão obtido exibe alta aromaticidade e maior concentração de grupos oxigenados funcionais, o que amplia sua aplicabilidade (Yihunu et al., 2019).

Embora apresente grande potencial, a aplicação da HTC na produção de catalisadores de base carbônica para síntese de biodiesel ainda é pouco explorada (Abdullah et al., 2021). Assim, este trabalho busca adotar a carbonização hidrotérmica na preparação de hidrocarbões empregados como suportes catalíticos, associados à impregnação de óxidos metálicos para introduzir propriedades ácidas. Dessa forma, objetiva-se caracterizar e avaliar o desempenho desses materiais na reação de transesterificação do óleo de andiroba para a produção de biodiesel, estabelecendo uma rota tecnológica que integra inovação científica, valorização de resíduos regionais e compromisso com os ODS, contribuindo para o avanço de alternativas energéticas sustentáveis e da economia circular.

Material e Métodos

Síntese do catalisador

A torta de andiroba (TA) foi moída e submetida a um tratamento hidrotérmico (1:10 m/v, 180 °C, 24 h). O hidrocarvão obtido (HCTA) foi filtrado, lavado com água quente e seco. O catalisador ácido foi sintetizado por impregnação via úmida, com proporção de molibdênio de 20% a partir do $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, agitado por 2 h, seco e calcinado a 450 °C por 3 h, chamado de 20Mo/HCTA.

Caracterização físico-química do óleo de andiroba

Índice de acidez e Viscosidade cinemática

O índice de acidez do óleo utilizado foi determinado a partir do método oficial da AOCS Cd 3d-63 (AOCS, 2001), utilizando a unidade de mg KOH/g.

A Viscosidade Cinemática à 40 °C foi determinada de acordo com o método ASTM D 445, utilizando um viscosímetro do modelo Cannon-Fenske (SCHOTT GERATE, Modelo nº 520 23).

Caracterização do catalisador

Difração de Raios-X (DRX), Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR), Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios-X por dispersão em energia (EDS)

Os difratogramas de raios-X (DRX) do suporte HCTA, da fase ativa MoO_3 e do catalisador 20Mo/HCTA foram coletados pelo método do pó em um difratômetro da PANalytical, modelo EMPYREAN. A radiação empregada e o intervalo de escaneamento foram de $\text{Cu K}\alpha$ (1.541874 Å) à 40 KV e 30 mA e $8^\circ < 2\theta < 70^\circ$.

Os espectros do suporte HCTA, da fase ativa MoO_3 e do catalisador 20Mo/HCTA foram analisados por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR), registrados em um espectrômetro BRUKER modelo VERTEX 70v, faixa espectral de 4000-300 cm^{-1} , resolução de 4 cm^{-1} e 32 acumulações.

A morfologia do material foi avaliada em um microscópio Tescan, modelo VEJA 3LMU e a análise de EDS foi realizada em um sistema de micro-análise Oxford, modelo AZTec Energy X-Act, resolução de 129 eV.

Síntese de Biodiesel

As reações de transesterificação foram realizadas em um reator PARR 5000 Multireactor, com agitação fixa de 900 RPM. O catalisador foi ativado a 105 °C por 1 h antes dos testes. As reações utilizando o óleo de andiroba (OA) ocorreram nas condições de: 140 °C, 2 h, RM 20:1, [c] 5%. Os catalisadores recuperados foram lavados com álcool etílico absoluto e hexano, secos a 105 °C por 12 h e armazenados. O biodiesel foi lavado com água destilada quente e seco a 60 °C.

Caracterização físico-química do biodiesel

Teor de éster

O teor de éster dos produtos das reações de transesterificação foi determinado por cromatografia gasosa, usando heptano como solvente e heptadecanoato de metila como padrão. As análises foram feitas em um cromatógrafo a gás Varian CP 3800 com detector de ionização de chama (FID) e coluna capilar CP WAX 52 CB (30 m de comprimento, 0,32 mm de diâmetro e 0,25 µm de filme). O gás hélio foi usado como fase móvel a 1 mL min⁻¹, com volume de injeção de 1 µL e temperatura inicial do forno de 170 °C, aumentando 10 °C min⁻¹ até 250 °C, conforme metodologia adaptada da norma EN14103.

Resultados e Discussão

A qualidade do biodiesel depende da matéria-prima oleaginosa. Por isso, é crucial determinar algumas características físicas e químicas do óleo de andiroba usado nas reações de transesterificação. As propriedades estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Características físico-químicas do óleo de andiroba

Propriedades	Resultados
Índice de Acidez (mg KOH/g)	4,00
Viscosidade Cinemática (mm ² /s)	42,08

O óleo de andiroba analisado apresentou índice de acidez de 4,0 mg KOH g⁻¹, valor que se encontra no limite máximo estabelecido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) para óleos brutos prensados a frio. Esse resultado está em consonância com os valores descritos para andiroba (2,14–4,74 mg KOH g⁻¹) por Mendonça (2015), indicando boa qualidade da matéria-prima e baixo grau de degradação. No entanto, por ser um valor ligeiramente alto, a presença de ácidos graxos livres pode comprometer processos de transesterificação catalisados por bases, favorecendo reações de saponificação, conforme discutido por Moraes (2017), o que reforça a importância do uso de catalisadores heterogêneos ácidos. Além disso, a viscosidade cinemática do óleo foi de 42,08 mm²/s a 40 °C, superior ao valor observado em outras matrizes oleaginosas convencionais como o óleo de soja (32–35 mm²/s, pois a viscosidade é variável nos óleos vegetais, sendo dependente do grau de insaturação e tamanho das cadeias graxas da sua composição, além de também ser influenciado pela presença de ramificações e posicionamento dessas insaturações (Melo et al., 2014).

Caracterização do catalisador

Difração de Raios-X

Os padrões de difração de raios X fornecem informações importantes sobre as fases presentes nos materiais de acordo com a intensidade e os ângulos de difração. Os padrões para HCTA, MoO₃ e para o catalisador 20Mo/HCTA são apresentados na Figura 1.

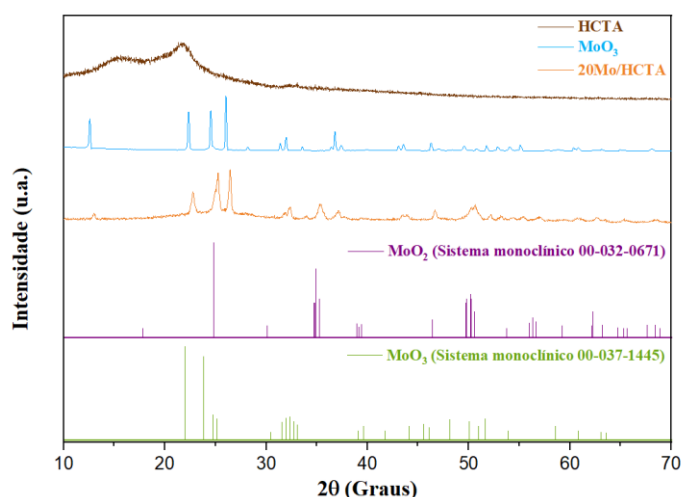


Figura 1. Difratoformas de raios-X de HCTA, MoO₃ e do catalisador

O difratograma revela a presença de fases cristalinas, indicando sucesso na funcionalização do hidrocarvão (HCTA) com MoO₃. Os picos característicos do MoO₃ puro (linha azul) estão bem definidos, compatíveis com a fase monoclinica de MoO₃ (JCPDS 00-037-1445), também representada na linha verde. A amostra funcionalizada (20Mo/HCTA, linha laranja) apresenta esses mesmos picos, embora com menor intensidade, o que sugere boa dispersão do MoO₃ sobre a matriz carbonácea e possível redução da cristalinidade devido à interação com o suporte. Além disso, não foram observados picos significativos de MoO₂ (linha roxa), indicando que não houve redução significativa do MoO₃ durante o processo de impregnação. A banda larga presente na amostra HCTA (linha marrom) entre 20° e 30° (2θ) é típica de materiais amorfos, confirmando a natureza desordenada do hidrocarvão. A sobreposição dos padrões confirma a incorporação bem-sucedida do MoO₃ ao suporte, mantendo sua estrutura cristalina e contribuindo para a funcionalidade catalítica do material.

Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier

A técnica de FT-IR é muito útil para investigar e identificar, qualitativamente, os agrupamentos funcionais presentes nos materiais. Os espectros FT-IR para HCTA, MoO₃ e o catalisador 20MoO₃/HCTA podem ser visualizados na Figura 3.

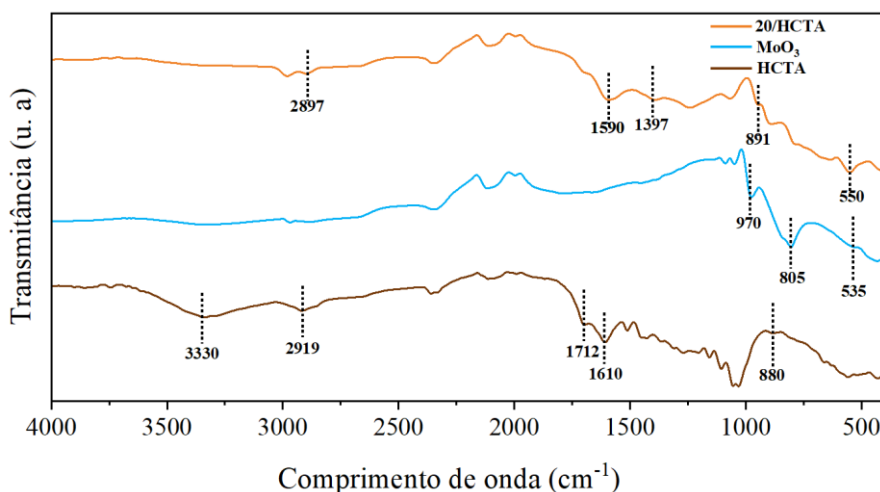


Figura 2. Espectros FTIR do HCTA, MoO₃ e do catalisador 20Mo/HCTA

O espectro do MoO_3 (linha azul) apresenta bandas características que confirmam a presença das ligações típicas desse óxido. A absorção em 535 cm^{-1} é atribuída à ligação Mo-O , enquanto as bandas em 805 cm^{-1} e 970 cm^{-1} correspondem, respectivamente, às vibrações de Mo-O-Mo e Mo=O , em concordância com os dados reportados para o trióxido de molibdênio em sua forma cristalina (Chithambararaj et al., 2013). Esses resultados evidenciam a natureza cristalina e a estrutura química bem definida do MoO_3 puro, utilizado como fase ativa no sistema catalítico.

No espectro do suporte HCTA (linha marrom), verificam-se bandas associadas a grupos funcionais característicos de materiais obtidos por hidrocarbonização hidrotérmica de biomassa. A absorção em 1610 cm^{-1} é atribuída ao estiramento C=C de anéis aromáticos, enquanto a banda em 1712 cm^{-1} está relacionada ao estiramento C=O de grupos carboxílicos. Já as bandas em 880 cm^{-1} e 2919 cm^{-1} correspondem às vibrações do tipo $=\text{C-H}$ e C-H , indicando a coexistência de estruturas alifáticas e aromáticas. Observa-se ainda a presença de uma banda larga em 3330 cm^{-1} , correspondente ao estiramento $-\text{OH}$, que pode estar associada a moléculas de água adsorvidas e grupos hidroxila superficiais, em concordância com estudos prévios sobre hidrocarvões derivados de biomassa residual (Abdullah et al., 2021).

Para o catalisador 20Mo/HCTA (linha laranja), nota-se a sobreposição de bandas referentes tanto ao suporte quanto à fase ativa. As absorções em 1397 cm^{-1} , 1590 cm^{-1} e 2897 cm^{-1} são atribuídas, respectivamente, às vibrações de C=C , C=O e C-H , demonstrando que a estrutura aromática e carboxílica do suporte foi preservada após a impregnação. Adicionalmente, surgem novas bandas em 550 cm^{-1} e 891 cm^{-1} , relacionadas às ligações Mo-O e Mo-O-O , confirmando a presença do óxido de molibdênio ancorado na superfície do hidrocarvão. A detecção simultânea desses sinais confirma o sucesso da impregnação e sugere a formação de sítios catalíticos ativos, adequados para a aplicação em reações de transesterificação.

MEV/EDS

A estrutura morfológica do 20Mo/HCTA foi analisada por MEV, com ampliações de 500x, 2500x e 5000x.

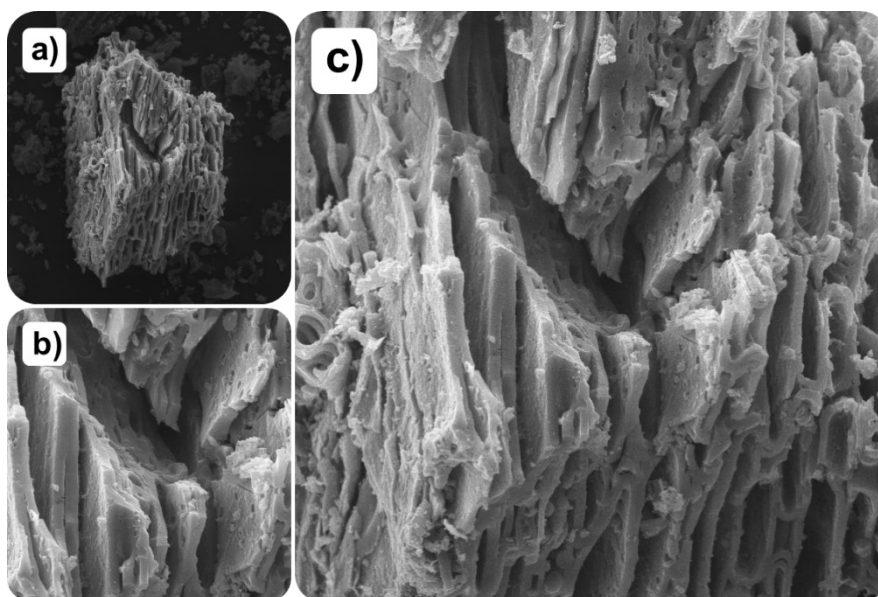


Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do catalisador 20Mo/HCTA nas ampliações (a) 500x, (b) 2500x e (c) 5000x

Aa micrografias do catalisador 20Mo/HCTA revela uma morfologia irregular e porosa, além de canais formados pela liberação de gases durante a carbonização de matéria orgânica rica em compostos lignocelulósicos (Ribeiro et al., 2023). Em maiores ampliações, observa-se a textura rugosa da superfície e evidências da impregnação de MoO_3 , indicando boa dispersão do metal ativo sobre o suporte. Essa combinação de porosidade, rugosidade e distribuição da fase ativa contribui para o aumento da área superficial e da acessibilidade dos sítios catalíticos, favorecendo o desempenho durante sua aplicação.

A composição e o mapeamento elementar para o catalisador são mostrados na Figura 4. O mapa elementar do catalisador indica a alta dispersão de todos os elementos presentes no catalisador 20Mo/HCTA, pois há uma alta intensidade de cores representando cada elemento em toda a imagem.

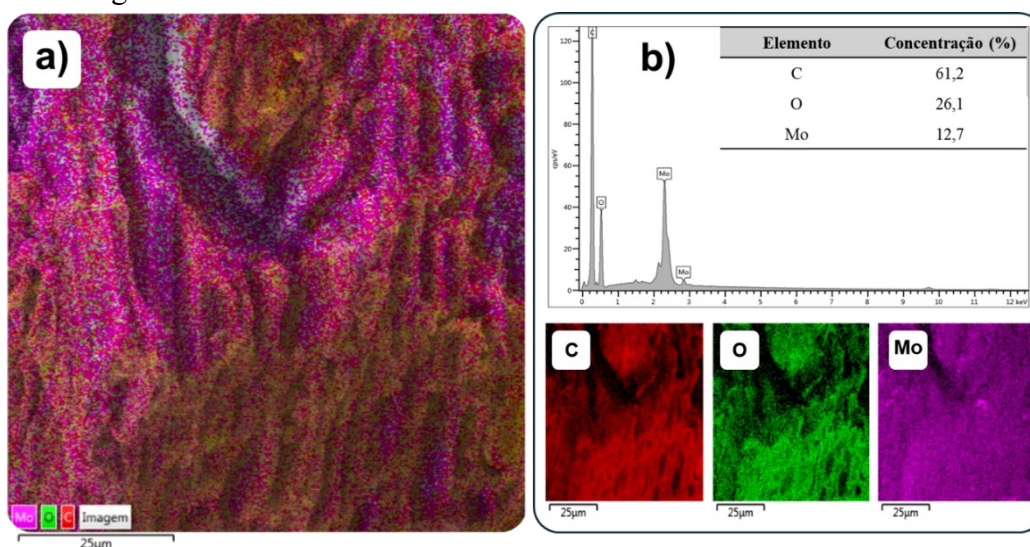


Figura 4. Composição química e mapa elementar do catalisador 20Mo/HCTA.

A Figura 4a mostra a distribuição elementar superficial, onde é possível confirmar que a estrutura do suporte é composta majoritariamente por carbono e a presença de molibdênio principalmente nas cavidades e sua inserção nos poros do material. Por se tratar de uma análise pontual, as concentrações observadas na Figura 4b podem variar de acordo com a região visualizada, entretanto, ainda se torna válida para confirmação da funcionalização do suporte.

Avaliação de eficiência e reusabilidade do catalisador

Os catalisadores heterogêneos ácidos apresentam algumas características e vantagens, entre elas a facilidade de separação de fases, possibilitando seu reuso em diversas reações, o que melhora o aspecto econômico quando comparado aos catalisadores homogêneos. Assim, a Figura 5 exibe os ciclos reacionais aos quais o catalisador 20Mo/HCTA foi submetido neste trabalho nas condições não otimizadas, de temperatura a 140 °C, razão molar MeOH:OA de 20:1, concentração de catalisador a 5% e tempo reacional de 2 h.

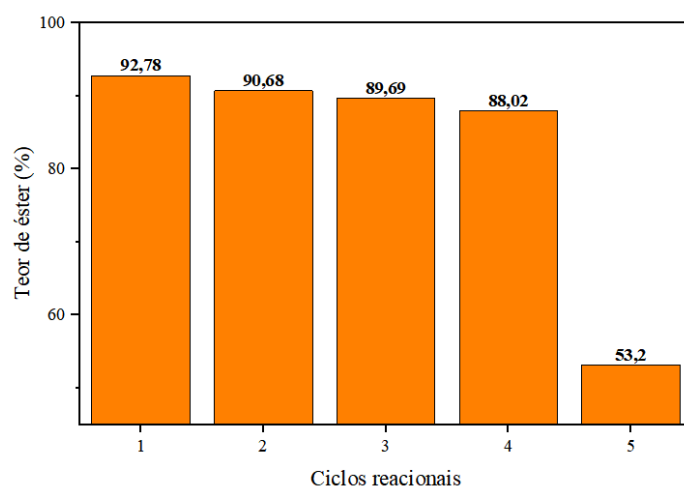


Figura 5. Avaliação da eficiência do catalisador

A Figura 5 mostra teores de éster acima de 90% nos primeiros dois ciclos reacionais. A diferença entre o primeiro e o quarto ciclo reacional é cerca de 4,7% confirmando seu potencial de reutilização. A queda na sua quinta aplicação (53,2%) pode ser atribuída à lixiviação e obstrução dos sítios ativos por matéria orgânica e à perda de massa do catalisador (Zhang *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2024). O resultado encontrado está em conformidade com o obtido por Gonçalves *et al.*, (2024) ao aplicar o catalisador 35-MoO₃/ZnFe₂O₄ na reação de transesterificação do óleo de andiroba com elevado índice de acidez e obter biodiesel com teor de éster de 91,2%.

Conclusões

Este trabalho demonstrou que a carbonização hidrotérmica da torta de andiroba permite obter hidrocarvões (HCTA) adequados como suporte catalítico para transesterificação. A impregnação de MoO₃ resultou no catalisador ácido 20Mo/HCTA, onde sua caracterização por DRX, FT-IR, MEV e EDS confirmou a preservação da estrutura do suporte, a presença da fase ativa e a alta dispersão do molibdênio. O catalisador gerou biodiesel com altos teores de ésteres (>85%) nos ciclos reacionais, demonstrando eficiência na transesterificação de óleo de andiroba com elevado índice de acidez. A reusabilidade foi mantida por quatro ciclos, com perda de atividade no quinto ciclo devido à lixiviação da fase ativa e obstrução de poros. Os resultados evidenciam que hidrocarvões derivados de biomassa residual podem ser utilizados como suportes para catalisadores heterogêneos ácidos, oferecendo uma rota sustentável para produção de biodiesel. A abordagem valoriza resíduos regionais, reduz impactos ambientais e contribui para alternativas energéticas renováveis, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável relacionados à energia limpa, consumo responsável e mitigação das mudanças climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Catálise e Oleoquímica (LCO/UFPA), Laboratório de Pesquisa e Análise de Combustíveis (LAPAC/UFPA) e ao Laboratório de Espectroscopia Vibracional e Altas Pressões da UFPA (LEVAP/UFPA) pelo apoio estrutural.

Referências

ABDULLAH, R. F., RASHID, U., IBRAHIM, M. L., NOLHAKIM, M. A. H. L., MOSER, B. R., ALHARTHI, F. A., Bifunctional biomass-based catalyst for biodiesel production via hydrothermal carbonization (HTC) pretreatment – Synthesis, characterization and optimization. **Process Safety and Environmental Protection**, 2021, v. 156, 219-230.

BORAH, M.J.; SARMAH, H.J.; BHUYAN, N.; MOHANTA, D.; DEKA, D. Application of BoxBehnken design in optimization of biodiesel yield using WO₃/graphene quantum dot (GQT) system and its kinetics analysis, **Biomass. Convers. Biorefin.** (2020) 1-12.

CAO, X., SUN S., SUN R., Application of biochar-based catalysts in biomass upgrading: A review, **RSC Adv.**, 2017, v. 7, 48793-48805.

CHITHAMBARARAJ, A.; SANJINI, N. S.; CHANDRA BOSE, A.; VELMATHI, S. Flower-like hierarchical h-MoO₃: new findings of efficient visible light driven nano photocatalyst for methylene blue degradation. **Catalysis Science & Technology**, 2013, 3, 1405.

CHONG, C. T.; LOE, T.Y.; WONG, K.Y.; ASHOKKUMAR, V.; CHONG, T.W.;

GONÇALVES, M. A.; MARES, E. K. L.; ZAMIAN, J. R.; FILHO, G. N. R.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Statistical optimization of biodiesel production from waste cooking oil using magnetic acid heterogeneous catalyst MoO₃/SrFe₂O₄. **Fuel**, v. 304, 121463, 2021.

GONÇALVES, M. A.; SANTOS, H. C. L.; SILVA, P. M. M.; CORRÊA, A. P. L.; RIBEIRO, T. S.; SOBRINHO, Z. A.; FILHO, G. N. R.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Catalytic conversion of residual raw material into biodiesel using a superior magnetic solid acid catalyst based on Zn-Fe ferrite: thermodynamic and kinetic studies. **RSC Advances**, v. 14, n. 29, p. 20743-20756, 2024.

HE, C., GIANNIS, A., WANG, J.Y., Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: hydrochar fuel characteristics and combustion behavior. **Appl. Energy**, 2013, v. 111, 257-266.

KALDERIS, D., KOTTI, M.S., MÉNDEZ, A., GASCÓ, G., Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of rice husk. **Solid Earth**, 2014, v. 5, 477-483.

LOW, W. Y., YEE F., A review on lignocellulosic biomass waste into biochar-derived catalyst: Current conversion techniques, sustainable applications and challenges, **Biomass and Bioenergy**, v. 154, 2021, 106245.

MARES, E. K. L.; GONÇALVES, M. A.; LUZ, P. T. S.; FILHO, G. N. R.; ZAMIAN, J. R.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Acai seed ash as novel basic heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis: optimization of the biodiesel production process. **Fuel**, v. 299, 2021, art. 120887.

MELO, M. A. M. F.; MELO, M. A. R.; PONTES, A. S. G. C. FARIAS, A. F. F.; DANTAS, M. B.; CALIXTO, C. D.; SOUZA, A. G.; CARVALHO FILHO, J.R. Non-conventional oils for biodiesel production: a study of thermal and oxidative stability. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, New York, 117, n. 2, p. 845-849, 2014.

MENDONÇA, A. P. **Secagem e extração do óleo das sementes de andiroba (*Carapa surinamensis* Miq. e *Carapa guianensis* Aubl.)**. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Coordenação de Silvicultura Tropical – CPST, Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais – CFT, Manaus, 2015.

MORAIS, V. S.; **Avaliação da qualidade do biodiesel em função da matéria-prima utilizada: óleos residuais de fritura de diferentes tipos e fontes**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Vitória, 2011.

MUNYENTWALI, A.; LI, H.; YANG, Q. Review of advances in bifunctional solid acid/base catalysts for sustainable biodiesel production. **Appl. Catal. A Gen.** 2022, 633, 118525.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. Transformando nosso mundo: A agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (A/RES/70/1). New York: ONU, 2015.

RIBEIRO, T. S., GONÇALVES, M. A., FILHO, G. N. R., CONCEIÇÃO, L. R. V. Functionalized Biochar from the Amazonian Residual Biomass Murici Seed: An Effective and Low-Cost Basic Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Synthesis. **Molecules**, 28 (24), 7980, 2023.

SANTOS, H. C. L.; GONÇALVES, M. A.; LIMA, V. S.; VIEGAS, A. C.; FILHO, G. N. R.; CONCEIÇÃO, L. R. V., NaAlO₂/CuFe₂O₄ as a novel basic magnetic heterogeneous catalyst for effective biodiesel production: Synthesis, characterization, and optimization via RSM-FCCD modeling approach. **Pro. Saf. and Env. Protection**, v. 189, 228-245, 2024.

YIHUNU, E. W., MINALE, M., ABEBE, S., LIMIN, M., 2019. Preparation, characterization and cost analysis of activated biochar and hydrochar derived from agricultural waste: a comparative study. **SN Appl. Sci.** v. 1, 873.



64º Congresso Brasileiro de Química
04 a 07 de novembro de 2025
Belo Horizonte - MG

ZHANG, Y. *et al.* Catalytic performance of NaAlO₂/γ-Al₂O₃ as heterogeneous nanocatalyst for biodiesel production: Optimization using response surface methodology. **Energy conversion and management**, v. 203, p. 112263, 2020.