

Panorama atual e perspectivas futuras do uso da biomassa da macaúba *Acrocomia aculeata* (Jack.) Lood. ex Mart. (Arecaceae): uma revisão sistemática da literatura

Emerson Fonseca Silva*, Hygor Aristides Victor Rossoni, Philipe Werner Sepúlveda e Juliana Cristina Tristão

Universidade Federal de Viçosa. Instituto de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários. *Campus Florestal*. Rodovia LMG 818, km 6. Florestal-MG, Brasil (CEP 35690-000). *E-mail: emerson.fonseca@ufv.br.

Resumo. A macaúba *Acrocomia aculeata* (Jack.) Lood. ex Mart. (Arecaceae) é uma palmeira oleaginosa amplamente distribuída pelo território brasileiro. Recentemente muita atenção tem sido dada a esta espécie, em função do alto teor de óleo proveniente de seu fruto, utilizado na produção de biodiesel e outros combustíveis derivados. No processamento de seu fruto há iminente geração de resíduos, que pode causar inúmeros passivos ambientais. Este trabalho busca, através de uma revisão sistemática da literatura, utilizando a metodologia de PRISMA, entender quais produtos tem sido gerado a partir dos resíduos da palmeira (casca, polpa, amêndoa, endocarpo e folhas) na atualidade. Para isso, foram utilizadas as bases de dados e portais acadêmicos *Google Scholar*, Periódicos CAPES e *Scopus*. Foram selecionados, a partir de uma série de critérios, 33 artigos para leitura total do texto e avaliação da elegibilidade, dos quais 14 foram selecionados para compor a revisão. Observou-se que a maior parte dos trabalhos busca produzir biocombustíveis e carvão ativado a partir de diferentes processos e técnicas. Ademais, este trabalho aponta algumas perspectivas e oportunidades futuras de pesquisa científica com os resíduos gerados a partir do processo de beneficiamento da macaúba, visando a obter produtos com alto valor agregado, mitigando possíveis impactos e otimizando a cadeia produtiva da espécie.

Palavras-chave: Resíduos; Biomassa; *Acrocomia aculeata*; Coprodutos.

Abstract. *Current overview and future perspectives for the use of biomass from macauba palm Acrocomia aculeata (Jack.) Lood. ex Mart. (Arecaceae): A systematic review of the literature.* The macauba *Acrocomia aculeata* (Jack.) Lood. ex Mart. (Arecaceae) is an oily palm tree widely distributed

Recebido
13/08/2024

Aceito
15/12/2024

Publicado
31/12/2024



Acesso aberto



ORCID

0009-0001-6990-0248
Emerson Fonseca Silva

0000-0002-6088-6144
Hygor Aristides Victor Rossoni

0009-0006-0201-2867
Philipe Werner Sepúlveda

0000-0001-5226-8381
Juliana Cristina Tristão

throughout Brazil. Recently, much attention has been given to this species due to the high oil content of its fruit, which is used in the production of biodiesel and other derived fuels. The processing of its fruit generates imminent waste, which can lead to numerous environmental liabilities. This study aims, through a systematic literature review using the adapted PRISMA methodology, to understand what scientific products have been generated from the macauba palm residues (shell, pulp, nut, endocarp, and leaves) in recent years. Databases and academic portals used include Google Scholar, CAPES Journals, and Scopus. Were selected, from a series of criteria, 33 papers for full-text reading and eligibility assessment, from which 14 articles were chosen for this review. It was observed that most of the studies focus on producing biofuels and activated carbons from various processes and techniques. Furthermore, this work outlines some perspectives and future research opportunities with the residues generated from macauba processing, aiming to obtain final products with high added value, mitigate potential impacts, and optimize the production chain of the species.

Keywords: Waste; Biomass; *Acrocomia aculeata*; Co-products.

Introdução

O avanço industrial e tecnológico trouxe diversos ganhos para a humanidade, mas também alguns alertas. Se antigamente era possível minerar recursos naturais deliberadamente, hoje em dia essa realidade não é mais aceita, pois se entende que os mesmos recursos não são renováveis (Ma et al., 2018; Hollas et al., 2021). A partir de então várias soluções vem sendo adotadas para uma produção, seja ela agrícola ou industrial, mais sustentável, com menor desperdício, e foco no reúso dos coprodutos gerados.

Tendo como ponto de partida este panorama, várias matérias-primas têm sido utilizadas como material precursor em biorrefinarias. Uma espécie que tem atraído a atenção da comunidade científica e da indústria é a macaúba, devido ao seu alto teor de óleo no fruto, com rendimento médio total, incluindo a polpa mais o caroço, superior a 1.000 kg de óleo/ha, sendo recomendado para a produção de biocombustíveis, além da versatilidade de seus resíduos (Ciconini et al., 2013; Evaristo et al., 2016; Machado et al., 2016).

A espécie arbórea *Acrocomia aculeata* (Jack.) Lood. ex Mart. (Arecaceae), popularmente conhecida como macaúba é uma palmeira oleaginosa, comumente encontrada na América Tropical e Subtropical é uma planta perene que também possui ampla distribuição por vários biomas do território brasileiro, com presença principalmente em áreas de vegetação aberta, cerrado, matas semidecíduas e florestas conturbadas (Lorenzi, 2004; Evaristo et al., 2016; Altino et al., 2017).

A palmeira serve como base de subsistência para famílias e comunidades carentes de baixa renda. Seu fruto, como principal produto, possui interesse econômico e industrial. Este é comumente coletado em campo, muitas vezes em populações naturais, armazenado e comercializado pelos coletores, agricultores familiares ou por meio de cooperativas municipais e regionais.

Há também um processo incipiente de domesticação dessa palmeira, plantios em larga escala, que poderia vir a favorecer a sua preservação e manutenção da variabilidade genética em populações naturais, contribuir para a criação de cultivares comerciais, além da perspectiva de geração de empregos formais e assegurados (Plath et al., 2016; Díaz et al., 2021; Francisconi et al., 2023).

Colombo et al. (2018) define algumas características do fruto desta espécie, (I) a estrutura do mesocarpo é abundante em polpa e pode ser consumido *in natura* ou utilizado para extração de óleo, (II) o pericarpo é quebradiço, fornece boa proteção ao mesocarpo e pode ser facilmente removido quando necessário, e (III) os frutos não fermentam rápido, sendo possível seu armazenamento, podendo ser utilizado como fonte energética alimentar. Além disso, tem-se o endocarpo que é um componente lenhoso, rico em carbono. Já a amêndoa está localizada no interior do fruto e possui propriedades alimentícias. Diante deste cenário a macaúba expressa grande interesse econômico e valor histórico social para o Brasil.

Com base nesse contexto, o presente trabalho possui o objetivo de avaliar, por meio de revisão sistemática da literatura (RSL), os principais coprodutos obtidos a partir do manejo da biomassa da macaúba nos últimos dez anos (2014-2024), além de apontar as perspectivas futuras e oportunidades de valorização de seus resíduos.

Material e métodos

A coleta de dados para esta revisão sistemática da literatura foi realizada utilizando a sugestão do método internacional *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). As buscas em sites da literatura acadêmica foram realizadas em algumas das principais plataformas de divulgação de trabalhos científicos. Foram pesquisados artigos em língua portuguesa e inglesa, seguindo a ordem de critérios mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Endereços eletrônicos e filtros de busca utilizados.

Site	
Google Scholar	https://scholar.google.com.br/?hl=pt
Periódicos CAPES	https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php
Scopus	https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic
Filtros	
I) Artigos de revistas científicas avaliadas como B1 ou superior, pelo portal Qualis Periódicos, no quadriênio 2017-2020.	
II) Artigos publicados nos últimos 10 anos, no período de 2014 a 2024, em função do escopo do estudo deste trabalho (panorama atual).	
III) Fator de impacto das revistas científicas.	
IV) Número de citações bibliográficas.	
V) Acesso livre ou artigos suportados pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), provida pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), que disponibiliza artigos gratuitamente para as instituições federais brasileiras associadas.	

Os termos de busca escolhidos (palavras-chave) foram macaúba, *Acrococomicia aculeata*, Arecaceae, biomassa, endocarpo, além de seus respectivos nomes em inglês (Tabela 2).

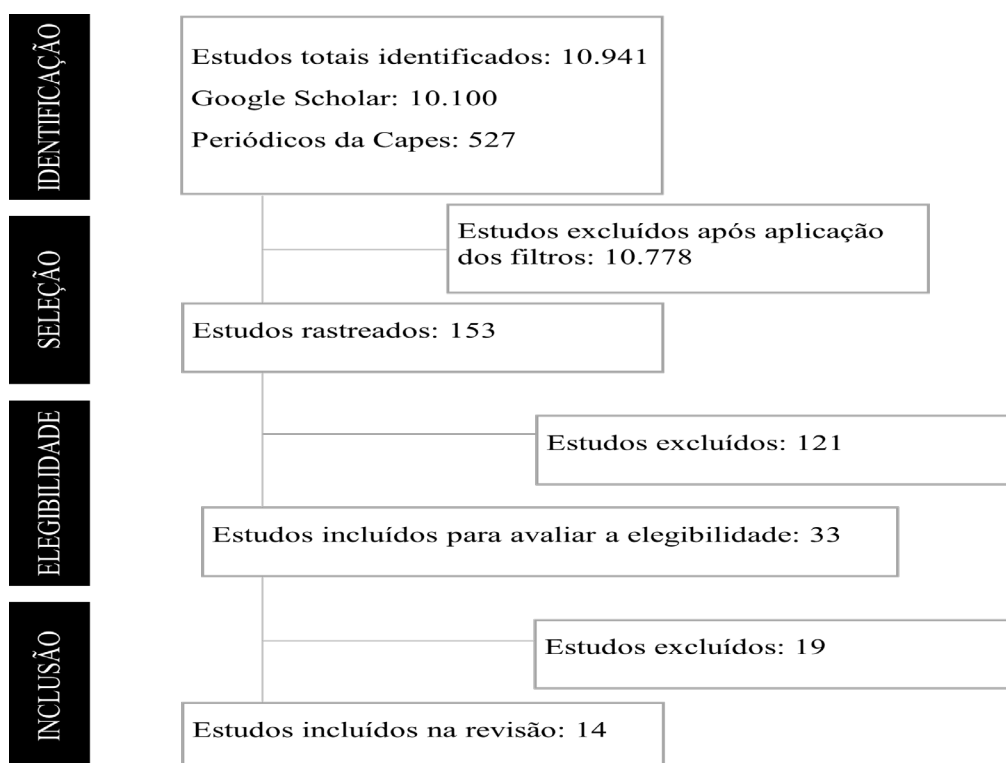
Tabela 2. Palavras-chaves escolhidas.

Nº	Palavras-chave	
	Português	Inglês
1	Macaúba	Macaba
2	<i>Acrocomia aculeata</i> **	<i>Acrocomia aculeata</i>
3	Arecaceae**	Arecaceae
4	Biomassa	Biomass
5	Endocarpo	Endocarp

Nota: *Optou-se por não se utilizar o termo de pesquisa em inglês “macaw”, uma vez que tem duplo sentido e pode significar “arara”, em tradução livre. **Os nomes científicos de espécies e famílias, da fauna e flora, por exemplo, são referidos em *latim*, que é a língua universal para sua denominação. Por isso não existe a possibilidade de promover a sua tradução.

Foram excluídos da seleção os trabalhos considerados como sendo proveniente de literatura cinzenta, aquela que não possui ampla circulação, não estando ao alcance da comunidade científica, tais como os trabalhos de conclusão de curso, dissertação de mestrado, tese de doutorado, artigos publicados em anais de congresso e informes técnicos ou institucionais, caracterizada muitas vezes como pobre em linguagem técnica e resultados questionáveis, bem como normalmente escrita em idioma diferente do inglês, idioma científico universal, e sem nenhum fator de impacto (Laufer, 2007).

A partir da coleta de dados para a revisão sistemática da literatura (RSL) nas plataformas previamente listadas, utilizando a sugestão da Metodologia PRISMA, foram encontrados um total de 10.941 resultados.

**Figura 1.** Fluxograma da metodologia PRISMA com as diferentes etapas de coletas de artigos científicos.

Para avaliar quais artigos se enquadravam no escopo do estudo foram aplicados os filtros de busca, posteriormente houve a remoção de artigos duplicados e em etapa subsequente a leitura dos resumos e abstracts dos trabalhos selecionados. Concluindo estas etapas foram selecionados 33 artigos para avaliação da elegibilidade, análise de conteúdo, dos quais foram selecionados 14 artigos para compor esta revisão sistemática da literatura (RSL). Os resultados da aplicação da metodologia podem ser visualizados na Figura 1.

Os artigos selecionados foram divididos em quatro linhas de estudo, seu agrupamento em compartimentos permite melhor visualização e análise dos trabalhos pesquisados (Tabela 3).

Tabela 3. Linhas de estudo adotadas.

Linhas de estudo		Definição
LE 1	Bio-óleo e biocombustíveis	Os trabalhos apresentam produtos obtidos a partir da extração e manipulação do óleo da polpa da macaúba.
LE 2	Uso do endocarpo da macaúba	Nesta linha de pesquisa são apresentados materiais porosos desenvolvidos a partir de endocarpos da macaúba para teste de remediação de águas poluídas por contaminantes emergentes.
LE 3	Casca da macaúba	Foram desenvolvidas briquetes a partir das cascas (pericarpo da macaúba).
LE 4	Uso de múltiplos componentes da palmeira	A mescla de variados componentes da biomassa da macaúba mostra-se promissora para obtenção de coprodutos com valor agregado.

Resultados e discussão

A partir do levantamento de dados, leitura e seleção dos trabalhos os artigos foram organizados e podem ser visualizados no (Tabela 4). Os artigos estão organizados por linhas de pesquisa e número de citações, respectivamente. Nas sessões subsequentes, os resultados foram expostos e organizados por linha de estudo, dessa forma é possível visualizar informações expandidas dos artigos selecionados apresentadas de forma descritiva, como (I) um resumo com as principais características do estudo, seus pontos fortes e algumas lacunas descritas pelos autores, (II) detalhamento dos procedimentos metodológicos, (III) resultados obtidos e (IV) síntese das conclusões.

A partir do levantamento bibliográfico foi possível identificar, com base na revisão sistemática da literatura (RSL), o que tem sido estudado sobre a biomassa da palmeira. Foi observado que a maior parte da produção científica se baseia no uso do fruto como matéria-prima. De acordo com Rios et al. (2023) a exploração da palmeira é recente e os estudos comumente dão ênfase à caracterização do fruto e sua germinação, com menor foco em outras aplicações de seus componentes visando o reaproveitamento dos subprodutos gerados.

Colombo et al. (2018) trouxeram perspectiva de estudos mais ampla acerca da macaúba e observaram que as principais linhas de pesquisa têm como foco a organização de bancos de germoplasma e a geração de cultivares de elite, técnicas de manejo, ecologia de polinização, clonagem, produção de mudas, bem como a valorização de coprodutos.

Tabela 4. Artigos finais selecionados para a revisão.

Linhas de estudo	Título	Autoria/ano	Periódico	Fator de impacto	Qualis CAPES	Citações
LE1	Biodiesel production from <i>Acrocomia aculeata</i> acid oil by (enzyme/enzyme) hydroesterification process: Use of vegetable lipase and fermented solid as low-cost biocatalysts	Aguiar et al., 2014.	Fuel, v. 135, p. 315-321.	7,4	A1	133
	Kinetics of ultrasound-assisted enzymatic biodiesel production from macauba coconut oil	Michelin et al., 2015.	Renewable Energy, v. 7, p. 388-393.	8,7	A1	64
	Synthesis of ethyl esters from crude macauba oil (<i>Acrocomia aculeata</i>) for biodiesel production	Souza et al., 2016.	Fuel, v. 165, p. 360-366.	7,4	A1	54
	Oil extraction from macauba pulp using compressed propane	Trentini et al., 2017.	The Journal of Supercritical Fluids, v. 126, p. 72-78.	3,9	A1	42
LE2	A rapid enzyme-catalyzed pretreatment of the acidic oil of macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) for chemoenzymatic biodiesel production	Teixeira et al., 2017	Process Biochemistry, v. 53, p. 188-193.	4,4	A3	17
	Production of cold-flow quality biodiesel from high-acidity on-edible oils: Esterification and transesterification of macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) oil using various alcohols	Silva et al., 2016.	BioEnergy Research, v. 9, p. 864-873	3,6	A2	15
	Rhodamine B removal with activated carbons obtained from lignocellulosic waste	Lacerda et al., 2015.	Journal of Environmental Management, v. 155, p. 67-76	8,7	A1	175
	Pyrolytic temperature evaluation of macauba biochar for uranium adsorption from aqueous solutions	Guilhena et al., 2019.	Biomass and Bioenergy, v. 122, p. 381-390	6,0	A1	53
LE3	Uranium removal from aqueous solution using macauba endocarp-derived biochar: Effect of physical activation	Guilhena et al., 2021	Environmental Pollution, v. 72, 116022.	8,9	A1	33
	Biosorption optimization of Ni (II) ions on macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) oil extraction residue using fixed-bed column	Altino et al., 2017.	Journal of environmental chemical engineering, v. 5, n. 5, p. 4895-4905	7,7	A2	12
	Efficient and easily scaled-up biosorbent based on natural and chemically modified macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) to remove Al ³⁺ , Mn ²⁺ and Fe ³⁺ from surface water contaminated with iron mining tailings	Giraldo-Bareño et al., 2023.	Talanta, v. 256, 124273	6,1	A1	4
	Briquettes quality produced with the macauba epicarp (<i>Acrocomia aculeata</i>) and <i>Pinus</i> sp. wood	Costa et al., 2019.	Revista Árvore, v. 43, n. 5, e430501.	0,5	B1	6
LE4	Prebiotic potential of pulp and kernel cake from jervia (<i>Syagrus romanzoffiana</i>) and macauba palm fruits (<i>Acrocomia aculeata</i>).	Andrade et al., 2020.	Food Research International, v. 136, 109595.	8,1	A1	25
	Cellulose nanocrystals from fibers of macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) and gravata (<i>Bromelia balansae</i>) from Brazilian pantanal	Corrêa et al., 2019.	Polymers, v. 11, n. 11, 1785.	5,0	A2	16

Nota: Com a nova atualização das avaliações das revistas no quadriênio 2017/2020 realizada pelo Qualis/Capes, houve uma padronização nas notas das áreas de pesquisa. Portanto a avaliação das revistas foi em área interdisciplinar.

Um dos pontos abordados por Colombo et al. (2018) foi justamente a valorização de coprodutos, que consiste no reaproveitamento dos componentes menos nobres da biomassa como forma de minimizar a geração de resíduos, reduzindo os impactos ambientais da atividade, além de agregar valor financeiro aos subprodutos gerados, dessa forma é possível trabalhar em um ciclo com melhor reaproveitamento de tudo que é produzido.

Linha de estudo 1 - Produção de bio-óleo e biocombustíveis

Observou-se que boa parte dos trabalhos tem o intuito de produzir biodiesel ou álcoois a partir do óleo de polpa da macaúba por meio de variadas rotas químicas.

Agueiras et al. (2014) apresentam técnica de produção de biodiesel a partir do óleo ácido do fruto da macaúba pelo processo de hidroesterificação enzima/enzima. Neste estudo pioneiro, os autores apresentam o desenvolvimento de biocatalisadores como solução alternativa, promovendo ganhos como redução nos custos de operação e produção além de ser ecologicamente sustentáveis.

Foram produzidos dois biodieseis, um com pH ácido e outro neutro, a partir de óleos brutos de polpa da macaúba. Os óleos foram submetidos à esterificação e à transesterificação com três álcoois diferentes, metílico, etílico e isobutílico. Suas características e comportamento foram comparados em condições de frio. A rota etílica foi a mais promissora, se enquadrando nos padrões internacionais em quesitos, como o teor de ésteres, a densidade, a viscosidade cinemática e o teor de enxofre (Silva et al., 2016).

Teixeira et al. (2017) avaliaram um método catalisado por lipase para redução da acidez do óleo de macaúba. O trabalho mostra o potencial da biocatálise heterogênea na redução da acidez do óleo, com resultados de 1,09% de acidez, podendo ser empregado em fábricas de biodiesel, que contenham instalações para processo convencional de transesterificação alcalina, desde que o óleo passe anteriormente por etapa de rápido pré-tratamento catalisado por enzimas que converte ácidos graxos livres (AGL) em ésteres metílicos (FAME).

Michelin et al. (2015) demonstraram técnicas de produção de ésteres etílicos de ácidos graxos a partir do óleo proveniente do coco da macaúba em reações de transesterificação enzimática sem solvente, usando uma lipase comercial imobilizada como catalizador sob a influência de irradiação ultrassônica, obtendo êxito ao converter o óleo de macaúba em ésteres alcoólicos, com rendimento de reação em torno de 70%, em curto tempo de reação 30 min. Já Souza et al. (2016), trazem a síntese de ésteres etílicos do óleo bruto para produção de biodiesel, apontando alguns desafios para se produzir um bio-óleo de alta qualidade. O produto foi obtido em condições de temperatura (100 °C-115 °C), razão molar etanol:óleo (8:12) e catalizador (ácido sulfúrico, 1,0% a 1,5%).

Trentini et al. (2017) investigaram a extração do óleo da polpa da macaúba utilizando propano comprimido como solvente em alternativa ao método convencional. Os autores avaliaram o efeito da temperatura (60 °C-100 °C) e da pressão (4-12 MPa) no rendimento do óleo e na composição química dos produtos. O efeito da temperatura foi negativo, enquanto o efeito da pressão auxiliou no processo de extração rápida utilizando o propano.

Linha de estudo 2 - Uso do endocarpo da macaúba

O endocarpo, no fruto da macaúba, fica em uma camada intermediária entre o mesocarpo e a amêndoa e possui caráter lenhoso, sendo assim estudado e apontado como promissor para a produção de carvão ativado para adsorção de contaminantes emergentes.

Existem algumas técnicas para produção de carvão ativado, como: ativação química; ativação física; e ativação térmica. No tratamento térmico Guilhen et al. (2019)

investigaram a influência pirolítica da temperatura para ativação dos endocarpos e sua influência na remoção de Urânio(VI) em soluções aquosas, com temperatura ideal de 350 °C, resultou em uma remoção de 80% do contaminante.

Em um estudo posterior, Guilhen et al. (2021) investigaram a influência da ativação física do carvão ativado com CO₂ e testaram a eficiência na remoção de íons uranila em soluções aquosas. O carvão ativado fisicamente apresentou maior eficiência de remoção em relação ao seu estudo anterior utilizando biocarvão, com remoção de 99% e 80,5%, respectivamente, evidenciando assim que a ativação promove ganhos ao material poroso (Guilhen et al., 2021).

Já os carvões ativados quimicamente (CAQ), com a adição de alguns reagentes químicos, foram testados para uma gama de contaminantes. Lacerda et al. (2015) avaliaram a remoção de Rodamina B., um corante têxtil, com um CAQ por CaCl₂ e outro com H₃PO₄. O processo de adsorção se ajusta a um modelo de pseudo-segunda ordem, onde a taxa de adsorção é beneficiada pelos sítios ativos dos materiais testados. Os dados de equilíbrio ajustam-se ao modelo de Isoterma de Freundlich, que pode ser associada à adsorção multicamada e à distribuição heterogênea de energia dos sítios ativos.

Outra técnica que pode ser empregada é a utilização matéria-prima sem nenhum tipo de ativação química, física ou térmica. Dessa forma, o material precursor, endocarpo, é chamado de biossorvente ou biomaterial. Altino et al. (2017) testaram a viabilidade de biomateriais provenientes do endocarpo da macaúba sob diferentes granulometrias para remoção de níquel Ni(II) em coluna de leito fixo, obtendo remoção final de 50,05% do contaminante.

Giraldo-Bareño et al. (2023) investigaram a remoção de Al³⁺, Mn²⁺ e Fe³⁺ de soluções aquosas e de águas superficiais influenciadas pelo rompimento de barragens, com a utilização de diferentes técnicas. Foi empregado o carvão ativado quimicamente com (NaOH), além de testarem a viabilidade da utilização de um biomaterial, endocarpos *in natura*. Os resultados de remoção para os metais, respectivamente, foram Al³⁺ = 0,268 mg.g⁻¹, Mg²⁺ = 1.379 mg.g⁻¹ e Fe³⁺ = 0,318 mg.g⁻¹.

O endocarpo da macaúba mostra-se versátil no que diz respeito ao seu uso para produção de (CA) a partir de diferentes técnicas de ativação e mesmo o endocarpo *in natura* mostra-se promissor para remoção de contaminantes emergentes, constituídos principalmente de produtos químicos sintéticos, provenientes de emissões industriais, medicinais, pecuária e resíduos domésticos, que possuem grande interesse da saúde pública, dessa forma requerem muita atenção acerca de estudos sobre suas identificações, implicações e potencial risco à saúde humana (Ouyang et al., 2022; Abafe et al., 2023). Todavia, não foram encontrados na literatura estudos que abordassem outras formas de uso ou oportunidades de valorização deste coproduto, sendo, assim, necessária a sua investigação.

Linha de estudo 3 - Casca da macaúba

Costa et al. (2019) obtiveram êxito ao produzir briquetes com epicarpo (casca) da macaúba associado a resíduos de madeira de *Pinus*. Os materiais foram produzidos sob pressão (100 PSI) e temperatura (120 °C-130 °C). Os autores recomendam a produção destes briquetes com pelo menos 50% de epicarpo da macaúba, por conferir maior resistência e densidade energética ao produto. Uma alternativa é a utilização de maiores percentagens de epicarpo da macaúba, reduzindo custos na produção de briquetes com *Pinus*, podendo aumentar a densidade aparente do material e o poder calorífico.

Linha de estudo 4 - Uso de múltiplos componentes da palmeira

Outras possibilidades para utilização da biomassa da macaúba são apresentadas por Andrade et al. (2020), ao realizar análise do potencial prebiótico da polpa e torta de amêndoa da macaúba, e do jerivá *Syagrus romanzoffiana*, para avaliar se estes subprodutos

eram ricos nutricionalmente e poderiam ser utilizados na alimentação humana. A partir da caracterização dos frutos por meio da composição centesimal, teor de compostos fenólicos e atividade antioxidante, além de avaliar a capacidade antimicrobiana e fermentativa os autores evidenciam que a torta e polpa apresentam elevado teor de fibra alimentar, 19,95%, para a polpa, e 35,81%, para a torta de amêndoa da macaúba, dessa forma, a polpa da macaúba apresenta características prebióticas em potencial, podendo ser utilizada como componente aditivo para aumentar o valor nutricional dos alimentos.

Corrêa et al. (2019) investigaram o potencial do uso de subprodutos da macaúba ricos em celulose (ráquis, folhas e polpa dos frutos), para a obtenção de nanocristais de celulose. As fibras passaram por mercerização e branqueamento em solução alcalina a fim de ser extraído o máximo de hemicelulose e lignina. Os nanocristais obtidos apresentaram estrutura com dimensões nanométricas e formatos aciculares. O aumento no tempo de hidrólise resultou na diminuição do comprimento (entre 580 e 190 nm) e do diâmetro (entre 69 e 15 nm). Além disso, houve redução nos índices de cristalinidade em tempo de hidrólise ácida superiores a 45 min.

Oportunidades de valorização de resíduos

A macaúba mostra-se versátil na valorização de resíduos, mas também possui grande potencial poluidor, caso não seja dada devida atenção à geração de resíduos em seu processo de beneficiamento. Dessa forma, destaca-se a necessidade da exploração sustentável de sua biomassa visando à valorização de seus coprodutos, agregando valor econômico e mitigando a geração de resíduos, de forma a contribuir com possibilidades de pesquisa científica e incentivo à produção de biotecnologias.

O bio-óleo da macaúba apresenta em sua composição carotenoides e tocoferóis, importantes fontes de vitaminas A e E, atribuindo-lhes propriedades medicinais e nutricionais, possibilitando o seu uso no setor alimentício e farmacêutico (Coimbra e Jorge, 2011). A torta de polpa e torta de amêndoa da macaúba está associadas à extração do óleo da palmeira pelos processos de secagem e prensagem e são ricos também em fibras alimentares, podendo ser utilizadas para enriquecer a textura, sabor e valor nutricional de produtos de panificação, por exemplo. Coimbra e Jorge (2011) recomendam realizar, em estudos posteriores, testes de toxicidade e fatores antinutricionais nos componentes citados.

Apesar de Coimbra e Jorge (2011) apresentarem algumas rotas de ativação dos endocarpos da macaúba, não se descarta a possibilidade de realização de novos estudos, uma vez que, assim como surgem novas tecnologias, surgem também novos desafios para administrá-las e ou mitigar seus impactos ambientais. Testes de remediação dos mais variados contaminantes utilizando carvão ativado de macaúba são necessários para avaliar o real potencial desta matéria-prima.

Outra rota emergente, ainda não aplicada ou não encontrada nas bases de dados, é a carbonização hidrotérmica (hidroativação), método responsável por converter materiais lignocelulósicos através de temperaturas moderadas (entre 120 °C e 250 °C), e pressões entre 2 e 10 MPa, durante um curto período de retenção (5-60 min), para geração de biocombustíveis alternativos (Zhuang et al., 2022).

Teixeira et al. (2018) demonstraram o potencial da utilização do epicarpo da macaúba para a produção de briquettes e Costa et al. (2019) mostraram a viabilidade da produção de briquetes a partir de epicarpos da macaúba mesclado com madeira de *Pinus*, uma sugestão seria o estudo da mescla entre epicarpos e endocarpos da palmeira, isso poderia ser interessante do ponto de vista da valorização dos resíduos e otimização de sua cadeia produtiva. Outra sugestão seria o desenvolvimento de *pellets*, material com processo de produção similar ao briquete, ambos possuem grande potencial energético, superior ao da madeira não processada, bom custo-benefício de produção, além de serem produtos sustentáveis e de fácil armazenamento (Ibitoye et al., 2021).

Apesar de não trazer avanços científicos e ou tecnológicos, o artesanato surge como uma boa alternativa para os demais resíduos da macaúba que não são usualmente utilizados, como folhas, cachos sem frutos e caules secos, por exemplo, que pode gerar renda adicional para os coletores.

Estas e outras sugestões de valorização dos resíduos da macaúba podem ser visualizados na Figura 2.

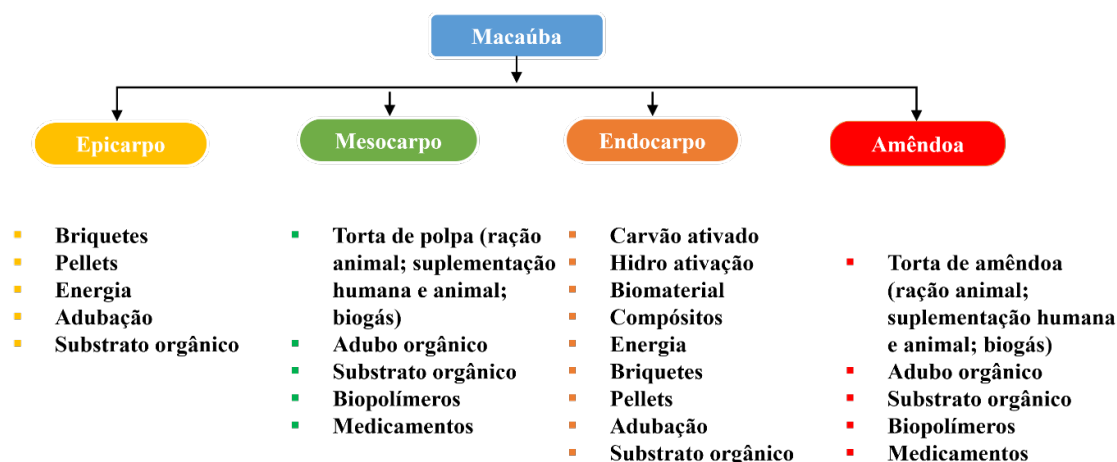


Figura 2. Oportunidades de valorização dos resíduos da macaúba.

Conclusão

Evidenciou-se que a utilização da biomassa da macaúba, principalmente o mesocarpo (polpa) e o endocarpo (tegumento), possui uma base bem consolidada para extração de bio-óleo para a produção de biodiesel e outros combustíveis derivados e produção de carvão ativado. Todavia ainda são necessários investimentos em infraestrutura, tecnologias e métodos para fabricação destes bio-óleos em escala industrial e com valor agregado competitivo em nível de mercado.

Nos estudos que abordam o desenvolvimento de briquetes e nanocristais de celulose, como Teixeira et al. (2018), Corrêa et al. (2019) e Costa et al. (2019), os autores caracterizam as pesquisas como exploratórias, sendo assim, não descartam novos estudos nas áreas temáticas.

Pouca pesquisa científica tem sido gerada nos últimos anos em relação à amêndoa presente no fruto, que possui alto valor energético e grandes possibilidades para utilização na alimentação humana e animal. Dessa forma, destaca-se a importância de trabalhos que busquem produzir informações acerca desse componente, como Coimbra e Jorge (2011) e Andrade et al. (2020). Uma boa alternativa é a investigação de seu uso para produção de suplementação.

Em relação ao epicarpo, a literatura mostra-se escassa, desta forma, este constituinte apresenta uma grande lacuna, em potencial para a pesquisa científica. O plantio em massa de macaúba para exploração plena de seu fruto deve levar em conta todos os possíveis passivos ambientais que podem ocorrer, caso não seja dada a devida atenção a alguma parte de seus componentes.

A macaúba é uma palmeira com grande potencial econômico para o país, principalmente em função do emprego de seu óleo de sua polpa. Ademais, fica evidente a importância da busca por soluções de descarte ou tratamentos para os resíduos gerados a fim de evitar desperdícios em prol de uma economia circular e sustentável. Esta pesquisa contribui com sugestões e soluções para utilização de sua biomassa para obtenção de coprodutos com alto valor agregado e mitigação de possíveis impactos ambientais advindos do descarte indevido no meio ambiente.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado, ao primeiro e terceiro autor deste trabalho.

Conflitos de interesses

Os autores declaram que não há interesses financeiros concorrentes ou relações pessoais conhecidas que possam ter influenciado as inferências relatadas neste artigo.

Referências

- Abafe, O. A.; Lawal, M. A.; Chokwe, T. B. Non-targeted screening of emerging contaminants in South African surface and wastewater. **Emerging Contaminants**, v. 9, n. 4, 100246, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100246>
- Agueiras, E. C. G.; Cavalcanti-Oliveira, E. D.; Castro, A. M.; Langone, M. A. P.; Freire, D. M. G. Biodiesel production from *Acrocomia aculeata* acid oil by (enzyme/enzyme) hydroesterification process: use of vegetable lipase and fermented solid as low-cost biocatalysts. **Fuel**, v. 135, p. 315-321, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.069>
- Altino, H. O. N.; Costa, B. E. S.; Cunha, R. N. Biosorption optimization of Ni (II) ions on macauba (*Acrocomia aculeata*) oil extraction residue using fixed-bed column. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 5, p. 4895-4905, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.025>
- Andrade, A. C.; Marinho, J. F. U.; Souza, A. C.; Tavares, T. S.; Dias, D. R.; Schwan, R. F.; Nunes, C. A.; Bastos, S. C. Prebiotic potential of pulp and kernel cake from jeriva (*Syagrus romanzoffiana*) and macauba palm fruits (*Acrocomia aculeata*). **Food Research International**, v. 136, 109595, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109595>
- Ciconini, G.; Favaro, S. P.; Roscoe, R.; Miranda, C. H. B.; Tapeti, C. F.; Miyahira, M. A. M.; Bearari, L.; Galvani, F.; Borsato, A. V.; Colnago, L. A.; Naka, M. H. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 208-214, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.12.008>
- Coimbra, M. C.; Jorge, N. Proximate composition of guariroba (*Syagrus oleracea*), jeriva (*Syagrus romanzoffiana*) and macauba (*Acrocomia aculeata*) palm fruits. **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 2139-2142, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.032>
- Colombo, C. A.; Berton, L. H. C.; Diaz, B. G.; Ferrari, R. A. Macauba: A promising tropical palm for the production of vegetable oil. **OCL**, v. 25, n. 1, D108, 2018. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017038>

- Corrêa, A. C.; Carmona, V. B.; Simão, J. A.; Galvani, F.; Marconcini, J. M.; Mattoso, L. H. C. Cellulose nanocrystals from fibers of macauba (*Acrocomia aculeata*) and gravata (*Bromelia balansae*) from Brazilian pantanal. **Polymers**, v. 11, n. 11, 1785, 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11111785>
- Costa, S. E. L.; Santos, R. C.; Castro, R. V. O.; Castro, A. F. N. M.; Magalhães, M. A.; Carneiro, A. C. O.; Santos, C. P. S.; Gomes, I. R. F.; Rochas, S. M. G. Briquettes quality produced with the macauba epicarp (*Acrocomia aculeata*) and *Pinus* sp. wood. **Revista Árvore**, v. 43, n. 5, e430501, 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000500001>
- Díaz, B. G.; Zucchi, M. I.; Alves-Pereira, A.; Almeida, C. P.; Moraes, A. C. L.; Vianna, S. A.; Azevedo-Filho, J.; Colombo, C. A. Genome-wide SNP analysis to assess the genetic population structure and diversity of *Acrocomia* species. **PLoS ONE**, v. 16, n. 7, e0241025, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241025>
- Evaristo, A. B.; Martino, D. C.; Ferrarez, A. H.; Donato, D. B.; Carneiro, A. C. O.; Grossi, J. A. S. Potencial energético dos resíduos de macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 571-577, 2016. <https://doi.org/10.5902/1980509822757>
- Francisconi, A. F.; Marroquín, J. A. M.; Cauz-Santos, L. A.; Van Den Berg, C.; Martins, K. K. M.; Costa, M. F.; Picanço-Rodrigues, D.; Alencar, L. D.; Zanello, C. A.; Colombo, C. A.; Hernández, B. G. D.; Amaral, D. T.; Lopes, M. T. G.; Veasey, E. A.; Zucchi, M. I. Complete chloroplast genomes of six neotropical palm species, structural comparison, and evolutionary dynamic patterns. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, 20635, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44631-4>
- Giraldo-Bareño, Y. Y.; Pinzón-García, A. D.; Sousa, D. V. M.; Bomfim Filho, L. F. O.; Lopes, D. H. A.; Cortés, N. S.; Morávia, M. C. S. A.; Sinisterra, R. D.; Orlando, R. M. Efficient and easily scaled-up biosorbent based on natural and chemically modified macauba (*Acrocomia aculeata*) to remove Al^{3+} , Mn^{2+} and Fe^{3+} from surface water contaminated with iron mining tailings. **Talanta**, v. 256, 124273, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124273>
- Guilhen, S. N.; Mašek, O.; Ortiz, N.; Izidoro, J. C.; Fungaro, D. A. Pyrolytic temperature evaluation of macauba biochar for uranium adsorption from aqueous solutions. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 381-390, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.008>
- Guilhen, S. N.; Rovani, S.; Araujo, L. G.; Tenório, J. A. S.; Mašek, O. Uranium removal from aqueous solution using macauba endocarp-derived biochar: Effect of physical activation. **Environmental Pollution**, v. 272, 116022, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116022>
- Hollas, C. E.; Bolsan, A. C.; Venturin, B.; Bonassa, G.; Tápparo, D. C.; Cândido, D.; Antes, F. G.; Vanotti, M. B.; Szögi, A. A.; Kunz, A. A second-generation phosphorus: Recovery from wastes towards the sustainability of production chains. **Sustainability**, v. 13, n. 11, 5919, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13115919>
- Ibitoye, S. E.; Jen, T.-C.; Mahamood, R. M.; Akinlabi, E. T. Densification of agro-residues for sustainable energy generation: An overview. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 8, n. 1, Article number 75, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w>
- Lacerda, V. S.; López-Sotelo, J. B.; Correa-Guimarães, A.; Hernández-Navarro, S.; Sánchez-Báscones, M.; Navas-Gracia, L. M.; Martín-Ramos, P.; Martín-Gil, J. Rhodamine B removal with activated carbons obtained from lignocellulosic waste. **Journal of Environmental Management**, v. 155, p. 67-76, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.007>

- Laufer, M. O que fazer com a literatura cinza? **Interciencia**, v. 32, p. 7, 2007. Disponível em: <http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442007000100003&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 23 abr. 2024.
- Lorenzi, H.; Souza, H. M.; Costa, J. T. M.; Cerqueira, L. S. C.; Ferreira, E. **Palmeiras brasileiras e exóticas cultivadas**. Nova Odessa: Plantarum, 2004.
- Ma, H.; Guo, Y.; Qin, Y.; Li, Y.-Y. Nutrient recovery technologies integrated with energy recovery by waste biomass anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 269, p. 520-531, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.114>
- Machado, W.; Figueiredo, A.; Guimarães, M. F. Initial development of seedlings of macauba palm (*Acrocomia aculeata*). **Industrial Crops and Products**, v. 87, p. 14-19, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.022>
- Michelin, S.; Penha, F. M.; Sychoski, M. M.; Scherer, R. P.; Treichel, H.; Valério, A.; Di Luccio, M.; Oliveira, D.; Oliveira, J. V. Kinetics of ultrasound-assisted enzymatic biodiesel production from macauba coconut oil. **Renewable Energy**, v. 76, p. 388-393, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.067>
- Ouyang, B.; Xu, W.; Zhang, W.; Guang, C.; Mu, W. An overview of different strategies involved in an efficient control of emerging contaminants: Promising enzymes and the related reaction process. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, 108211, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108211>
- Pérez, A. T. E.; Camargo, M.; Rincón, P. C. N.; Marchant, M. A. Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 350-359, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.084>
- Pires, P. C. L.; César, A. S.; Cardoso, A. N.; Favaro, S. P.; Conejero, M. A. Strategies to improve the competitiveness of an agroindustrial system for a macauba based oil production in Minas Gerais State, Brazil. **Land Use Policy**, v. 126, 106552, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106552>
- Plath, M.; Moser, C.; Bailis, R.; Brandt, P.; Hirsch, H.; Klein, A.-M.; Walmsley, D.; Von Wehrden, H. A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. **Biomass and Bioenergy**, v. 91, p. 186-195, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.009>
- Rios, R. D. F.; Bueno, P. J. B.; Terra, J. C. S.; Moura, F. C. C. Influence of the surface modification of granular-activated carbon synthesized from macauba on heavy metal sorption. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 11, p. 31881-31894, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23736-9>
- Silva, L. N.; Cardoso, C. C.; Pasa, V. M. D. Production of cold-flow quality biodiesel from high-acidity on-edible oils: Esterification and transesterification of macauba (*Acrocomia aculeata*) oil using various alcohols. **BioEnergy Research**, v. 9, p. 864-873, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9740-4>
- Souza, G. K.; Scheufele, F. B.; Pasa, T. L. B.; Arroyo, P. A.; Pereira, N. C. Synthesis of ethyl esters from crude macauba oil (*Acrocomia aculeata*) for biodiesel production. **Fuel**, v. 165, p. 360-366, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.068>
- Teixeira, D. A.; Motta, C. R.; Ribeiro, C. M. S.; Castro, A. M. A rapid enzyme-catalyzed pretreatment of the acidic oil of macauba (*Acrocomia aculeata*) for chemoenzymatic biodiesel production. **Process Biochemistry**, v. 53, p. 188-193, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.12.011>

Teixeira, V. L.; Carneiro, A. C. O.; Evaristo, A. B.; Faria, B. F. H.; Donato, D. B.; Magalhães, M. A. Potential of macauba epicarp (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Martius) for briquettes production. **Floresta**, v. 48, n. 4, p. 563-572, 2018. <https://doi.org/10.5380/rf.v48i4.57397>

Trentini, C. P.; Santos, K. A.; Silva, E. A.; Garcia, V. A. S.; Cardozo-Filho, L.; Silva, C. Oil extraction from macauba pulp using compressed propane. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 126, p. 72-78, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.02.018>

Zhuang, X.; Liu, J.; Zhang, Q.; Wang, C.; Zhan, H.; Ma, L. A review on the utilization of industrial biowaste via hydrothermal carbonization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 154, 111877, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111877>



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.

Tabela 4. Artigos finais selecionados para a revisão.

Linha de estudo	Título	Autoria/ano	Periódico	Fator de impacto	Qualis CAPES	Citações
LE1	Biodiesel production from <i>Acrocomia aculeata</i> acid oil by (enzyme/enzyme) hydroesterification process: Use of vegetable lipase and fermented solid as low-cost biocatalysts	Aguiéiras et al., 2014.	Fuel, v. 135, p. 315-321.	7,4	A1	133
	Kinetics of ultrasound-assisted enzymatic biodiesel production from macauba coconut oil	Michelin et al., 2015.	Renewable Energy, v. 7, p. 388-393.	8,7	A1	64
	Synthesis of ethyl esters from crude macauba oil (<i>Acrocomia aculeata</i>) for biodiesel production	Souza et al., 2016.	Fuel, v. 165, p. 360-366.	7,4	A1	54
	Oil extraction from macauba pulp using compressed propane	Trentini ^a et al., 2017.	The Journal of Supercritical Fluids, v. 126, p. 72-78.	3,9	A1	42
	A rapid enzyme-catalyzed pretreatment of the acidic oil of macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) for chemoenzymatic biodiesel production	Teixeira et al., 2017	Process Biochemistry, v. 53, p. 188-193.	4,4	A3	17
	Production of cold-flow quality biodiesel from high-acidity on-edible oils: Esterification and transesterification of macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) oil using various alcohols	Silva et al., 2016.	BioEnergy Research, v. 9, p. 864-873	3,6	A2	15
LE2	Rhodamine B removal with activated carbons obtained from lignocellulosic waste	Lacerda et al., 2015.	Journal of Environmental Management, v. 155, p. 67-76	8,7	A1	175
	Pyrolytic temperature evaluation of macauba biochar for uranium adsorption from aqueous solutions	Guilhena et al., 2019.	Biomass and Bioenergy, v. 122, p. 381-390	6,0	A1	53
	Uranium removal from aqueous solution using macauba endocarp-derived biochar: Effect of physical activation	Guilhenb et al., 2021	Environmental Pollution, v. 72, 116022.	8,9	A1	33
	Biosorption optimization of Ni (II) ions on macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) oil extraction residue using fixed-bed column	Altino et al., 2017.	Journal of environmental chemical engineering, v. 5, n. 5, p. 4895-4905	7,7	A2	12
	Efficient and easily scaled-up biosorbent based on natural and chemically modified macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) to remove Al ³⁺ , Mn ²⁺ and Fe ³⁺ from surface water contaminated with iron mining tailings	Giraldo-Bareño et al., 2023.	Talanta, v. 256, 124273	6,1	A1	4
LE3	Briquettes quality produced with the macauba epicarp (<i>Acrocomia aculeata</i>) and <i>Pinus</i> sp. wood	Costa et al., 2019.	Revista Árvore, v. 43, n. 5, e430501.	0,5	B1	6
LE4	Prebiotic potential of pulp and kernel cake from jeriva (<i>Syagrus romanzoffiana</i>) and macauba palm fruits (<i>Acrocomia aculeata</i>).	Andrade et al., 2020.	Food Research International, v. 136, 109595.	8,1	A1	25
	Cellulose nanocrystals from fibers of macauba (<i>Acrocomia aculeata</i>) and gravata (<i>Bromelia balansae</i>) from Brazilian pantanal	Corrêa et al., 2019.	Polymers, v. 11, n. 11, 1785.	5,0	A2	16

Nota: Com a nova atualização das avaliações das revistas no quadriênio 2017/2020 realizada pelo Qualis/Capes, houve uma padronização nas notas das áreas de pesquisa. Portanto a avaliação das revistas foi em área interdisciplinar.

