

PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO ENZIMAS COMO CATALIZADORES

Juliana da Cruz Araújo⁽¹⁾,
Juliana Lobo Paes⁽²⁾,
Joel Carlos Zukowski Junior⁽³⁾

Resumo – O biodiesel é uma alternativa sustentável ao diesel de petróleo e a catálise via enzimas representa uma rota tecnológica limpa e eficiente na produção de biodiesel. Objetivou-se realizar uma análise bibliométrica das publicações científicas mundiais sobre a produção de biodiesel utilizando enzimas como catalisadores e buscar a correlação de artigos que relacionem a produção de biodiesel via catálise enzimática utilizando óleo de macaúba como matéria prima. A metodologia baseou-se em uma abordagem quantitativa e qualitativa, com coleta de dados realizada na plataforma Scopus, utilizando a *string* de busca “biodiesel” AND “transesterification” AND “enzymes” e posteriormente o filtro “macauba oil” e delimitando o período de 2020 a 2025. Obteve-se um portfólio de 405 documentos, que foram analisados com o software VOSviewer para mapear redes de publicações, citações, coautorias e palavras-chave. Os resultados indicaram que os anos de 2021 e 2022 apresentaram o maior número de publicações sobre o tema. A análise de citação destacou o artigo de Koul et al. (2022) como o mais influente, com 740 citações. Na análise de coautoria de países a Índia (99 documentos) foi o país mais produtivo. A análise de coocorrência de palavras-chave identificou “biodiesel” (324 ocorrências) e “transesterification” (250 ocorrências) como os termos de maior relevância. Conclui-se que a catálise enzimática é uma rota fundamental para a produção sustentável de biodiesel, alinhando-se aos princípios da química verde. Entretanto é necessário que haja mais produções científicas que envolvam pesquisas utilizando o óleo de macaúba na produção de biodiesel através da catálise enzimática.

Palavras-chave: catálise enzimática; macaúba e transesterificação.

BIODIESEL PRODUCTION USING ENZYMES AS CATALYSTS

Abstract – Biodiesel is a sustainable alternative to petroleum diesel, and enzyme catalysis represents a clean and efficient technological route for biodiesel production. The objective was to conduct a bibliometric analysis of global scientific publications on biodiesel production using enzymes as catalysts and to seek a correlation of articles relating biodiesel production via enzymatic catalysis using macauba oil as feedstock. The methodology was based on a quantitative and qualitative approach, with data collection carried out on the Scopus platform, using the search string “biodiesel” AND “transesterification” AND “enzymes” and subsequently the “macaúba oil” filter, limiting the period from 2020 to 2025. A portfolio of 405 documents was obtained, which were analyzed with the VOSviewer software to map publication, citation, co-authorship, and keyword networks. The results indicated that 2021 and 2022 had the highest number of publications on the topic. Citation analysis highlighted the article by Koul et al. (2022) as the most influential, with 740 citations. In the country co-authorship

¹ Mestranda do Programa de Pós Graduação em Agroenergia Digital da Universidade Federal do Tocantins. juliana.cruz@uft.edu.br. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2300761538624250>

² Professora do Programa Pós Graduação em Agroenergia Digital da Universidade Federal do Tocantins. juliana.lobop@gmail.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8567579362150921>

³ Professor do Programa Pós Graduação em Agroenergia Digital da Universidade Federal do Tocantins. zukowski@uft.edu.br. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0062084279231594>

analysis, India (99 documents) was the most productive country. The keyword co-occurrence analysis identified "biodiesel" (324 occurrences) and "transesterification" (250 occurrences) as the most relevant terms. It is concluded that enzymatic catalysis is a fundamental route for sustainable biodiesel production, aligning with the principles of green chemistry; however, more scientific productions involving research using macaúba oil for biodiesel production via enzymatic catalysis are needed.

Keywords: enzymatic catalysis; macauba and transesterification.

Introdução

O crescente interesse em fontes de energia renováveis tem impulsionado a produção de biodiesel, um substituto sustentável para o diesel de petróleo. No contexto nacional, a diversidade de matérias-primas oleaginosas usada na produção de biodiesel vão da soja à macaúba, além de óleos residuais e gorduras animais (EMBRAPA, 2021). O método de produção predominante é a transesterificação catalítica, um processo que converte triglicerídeos em ésteres metílicos ou etílicos (biodiesel) na presença de um álcool (BRASIL, 2020).

As lipases são enzimas que catalisam naturalmente a hidrólise de cadeias longas de triglicerídeos insolúveis em meio aquoso, essas propriedades permitem que elas sejam empregadas em diferentes reações bioquímicas, incluindo a transesterificação (SILVA, 2023a).

O óleo de macaúba possui um alto índice de acidez e não pode ser usado como matéria-prima para a produção de biodiesel pela rota alcalina convencional (PASA et al, 2020). Um possível risco do uso de um óleo com alto índice de acidez na transesterificação, por meio da catálise básica, e que pode haver a formação de estruturas saponificadas. Com isso é necessário que se faça um procedimento de purificação do óleo para reduzir a acidez e desse modo o processo de produção fica mais complexo e com maior custo operacional.

As lipases são capazes de catalisar a hidrólise de ligações éster em acilgliceróis. Esta característica simplifica o processo produtivo do biodiesel, especialmente ao utilizar matérias-primas de alta acidez, como o óleo de macaúba, uma palmeira nativa de grande potencial oleaginoso (SILVA, 2023b).

Em síntese, a aplicação de lipases na produção de biodiesel constitui uma rota tecnológica limpa e eficiente, que se mostra como uma alternativa promissora para ser utilizada na produção de biodiesel a partir do óleo de macaúba. Essa abordagem biotecnológica não apenas mitiga os impactos ambientais associados aos processos químicos convencionais, mas também possui o potencial de consolidar matérias-primas complexas e promissoras, como pilares na produção de biocombustíveis de alta qualidade.

Objetivou-se realizar uma análise bibliométrica das publicações científicas mundiais sobre a produção de biodiesel utilizando enzimas como catalisadores. Identificar os autores, as instituições de pesquisa e os periódicos mais influentes e produtivos nesse campo de estudo. Além de buscar a correlação de artigos que relacionem a produção de biodiesel via catálise enzimática utilizando óleo de macaúba como matéria prima.

Material e Métodos

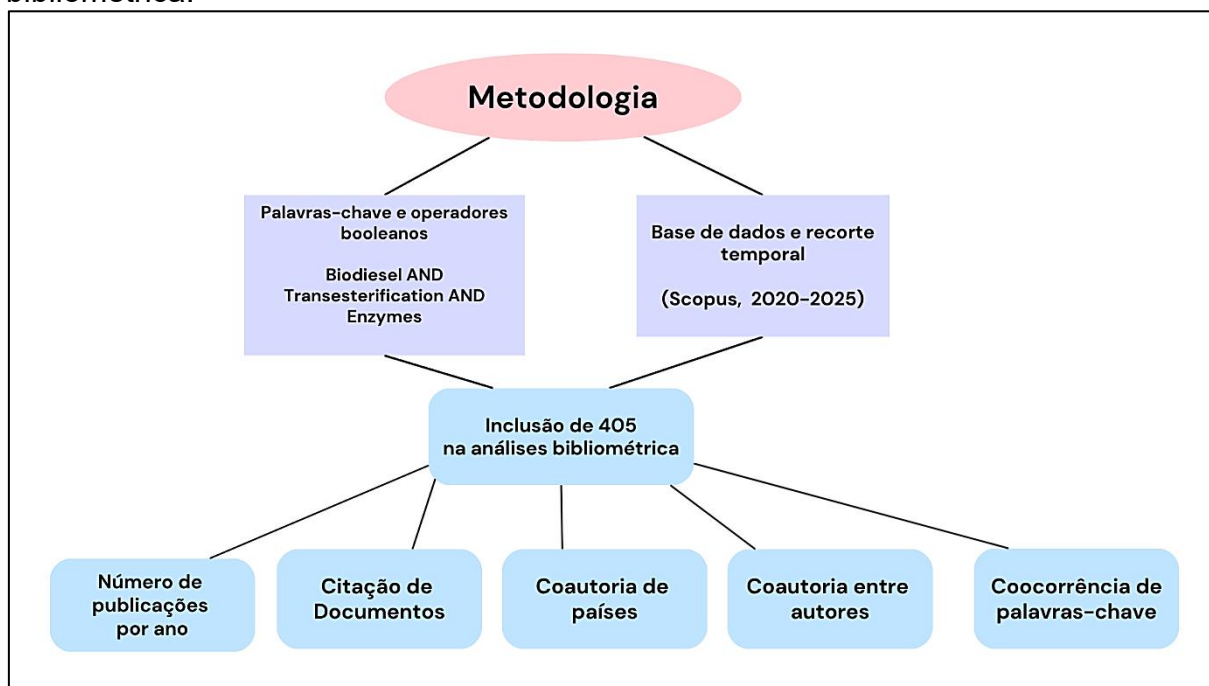
A presente pesquisa foi desenvolvida com base em uma abordagem quantitativa e qualitativa, por meio de uma análise bibliométrica da produção científica

sobre o tema biodiesel, transesterificação e enzimas. Os procedimentos metodológicos foram estruturados em duas fases principais: a coleta de dados bibliográficos na base de dados Scopus, acessada via Portal de Periódicos da Capes, e a subsequente análise e visualização desses dados com o auxílio do software VOSviewer.

O levantamento dos dados foi realizado na base de dados Scopus, o acesso à plataforma foi efetuado por meio da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), disponibilizada pelo Portal de Periódicos da Capes. A string de busca foi construída utilizando o operador booleano (AND) focando nos campos de título, resumo e palavras-chave. A consulta foi estruturada da seguinte forma: “biodiesel AND transesterification AND enzymes”. Como critérios de inclusão, foram selecionados apenas artigos publicados no período de 2020 a 2025, a fim de delimitar o escopo temporal da análise.

Após a execução da busca e aplicação dos filtros, obteve-se um portfólio de 405 documentos. Esses dados foram então exportados da Scopus no formato CSV excel e txt. No ato da exportação, foram selecionados todos os campos de informação bibliográfica relevantes para a análise, incluindo informações de citação, dados bibliográficos (autores, afiliações), resumo, palavras-chave (do autor e indexadas) e referências (Figura 1).

Figura 1 – Etapas de coleta de dados através da plataforma Scopus e análise bibliométrica.



Fonte: Própria (2025)

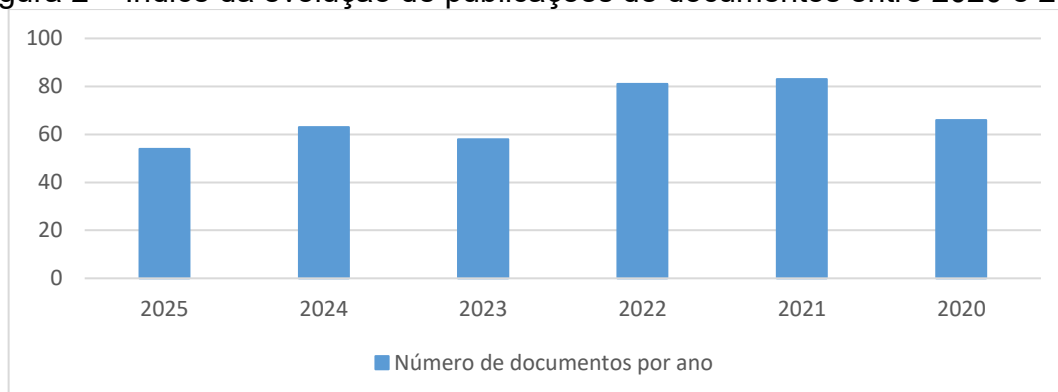
Para o tratamento e a visualização dos dados, foi utilizado o software VOSviewer (versão 1.6.20), uma ferramenta desenvolvida para a criação e exploração de mapas bibliométricos. Foram realizadas cinco análises principais: número de publicações por ano, citação de documentos, coautoria entre autores, coautoria de países e coocorrência de palavras-chave.

Resultados e Discussão

Número de publicações por ano

A Figura 2, mostra a evolução das publicações de documentos ao longo dos anos (2020 a 2025), referente ao uso de enzimas no processo de transesterificação da produção de biodiesel.

Figura 2 – Índice da evolução de publicações de documentos entre 2020 e 2025



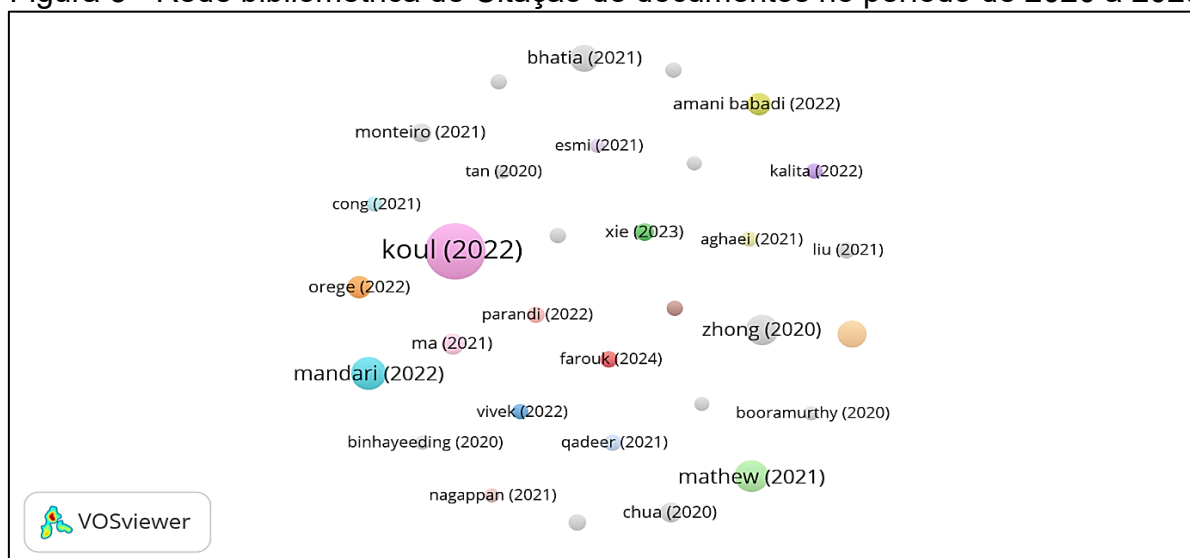
Fonte: Própria (2025)

Os anos com maiores números de documentos publicados foram 2021 e 2022 com 83 e 81 publicações respectivamente. Entretanto é possível observar que a média das publicações anuais sobre o tema no gráfico são semelhantes, variando entre 54 e 83 documentos.

Citação de documentos

A Figura 3 mostra os documentos com relação de citação entre eles, divididos em 32 cluters. Na rede bibliométrica o tamanho dos círculos está representando o número de citações dos documentos no período de 2020 a 2025.

Figura 3 - Rede bibliométrica de Citação de documentos no período de 2020 a 2025.



Fonte: Própria (2025)

A rede bibliométrica mostra os resultados dos documentos mais citados sobre a temática estudada. A Tabela 1 mostra o ranking dos cinco documentos com maior número de citações. O artigo mais citado foi o de Koul et al. (2022) intitulado “Agricultural waste management strategies for environmental sustainability” publicado no periódico Environmental Research, com 740 citações. O artigo aborda uma revisão sobre o problema global da má gestão dos resíduos agrícolas, que atualmente causam poluição e aquecimento global por serem majoritariamente queimados ou enterrados. O texto propõe a "valorização" desses resíduos (ricos em celulose e lignina) através da bioeconomia circular. A estratégia foca em "reduzir, reutilizar e reciclar" os RAs para transformá-los em produtos de valor agregado, como biocombustíveis, bioplásticos e biofertilizantes, visando promover a agricultura sustentável e minimizar a poluição.

Tabela 1 – Ranking dos 5 documentos mais citados entre 2020 e 2025

Ranking	Título	Primeiro autor/ano	Nº de Citações	Periódico	DOI
1	Agricultural waste management strategies for environmental sustainability	Koul et al (2022)	737	Environmental Research	https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285
2	Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review	Mandari e Devarai (2022)	373	BioEnergy Research	https://doi.org/10.1007/s12155-021-10333-w
3	Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions	Mathew et al (2021)	299	Science of The Total Environment	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.14875
4	Production and use of immobilized lipases in/on nanomaterials: A review from the waste to biodiesel production	Zhong et al (2020)	284	International Journal of Biological Macromolecules	https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.258
5	An overview on advancements in biobased transesterification methods for biodiesel production: Oil resources, extraction, biocatalysts, and process intensification technologies	Bhatia et al (2021)	227	Fuel	https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119117

Fonte: Própria (2025)

O segundo artigo intitulado "Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review" é uma revisão crítica abrangente sobre os métodos de produção de biodiesel. Foi publicado no periódico *BioEnergy Research*, o artigo de Venkatesh Mandari e Santhosh Kumar Devarai (2022) analisa e compara diferentes abordagens catalíticas (homogênea, heterogênea e enzimática) usadas nos processos de transesterificação e esterificação para a fabricação de biodiesel, frequentemente utilizando matérias-primas como óleos de cozinha usados.

O terceiro artigo mais citado é o "Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions". Foi publicado no periódico *Science of The Total Environment* e escrito por Mathew et al. (2021). O artigo fala o uso de enzimas como catalisadores no processo de transesterificação na produção de biodiesel. Ele compara os dois principais métodos de produção: a catálise química tradicional (ácida ou alcalina) e a transesterificação mediada por enzimas. O foco principal é a vantagem do processo enzimático, considerado mais ecológico. O artigo ressalta os desafios no processo de produção, que ainda devem ser superados, como melhorar a eficiência, a resistência ao álcool e a taxa de recuperação dessas enzimas.

O quarto artigo mais citado é o "Production and use of immobilized lipases in/on nanomaterials: A review from the waste to biodiesel production". Foi publicado no periódico *International Journal of Biological Macromolecules* e escrito por Zhong et al. (2020). O artigo é focado na produção de biodiesel através do uso de lipases imobilizadas (enzimas) como biocatalisadores. A tecnologia principal consiste em fixar essas enzimas em suportes específicos para que atuem na reação de produção do biodiesel. O artigo destaca o uso de nanomateriais como nano-silício, nanopartículas magnéticas e nanotubos de carbono como suportes ideais, visto que eles melhoram significativamente a eficiência do processo.

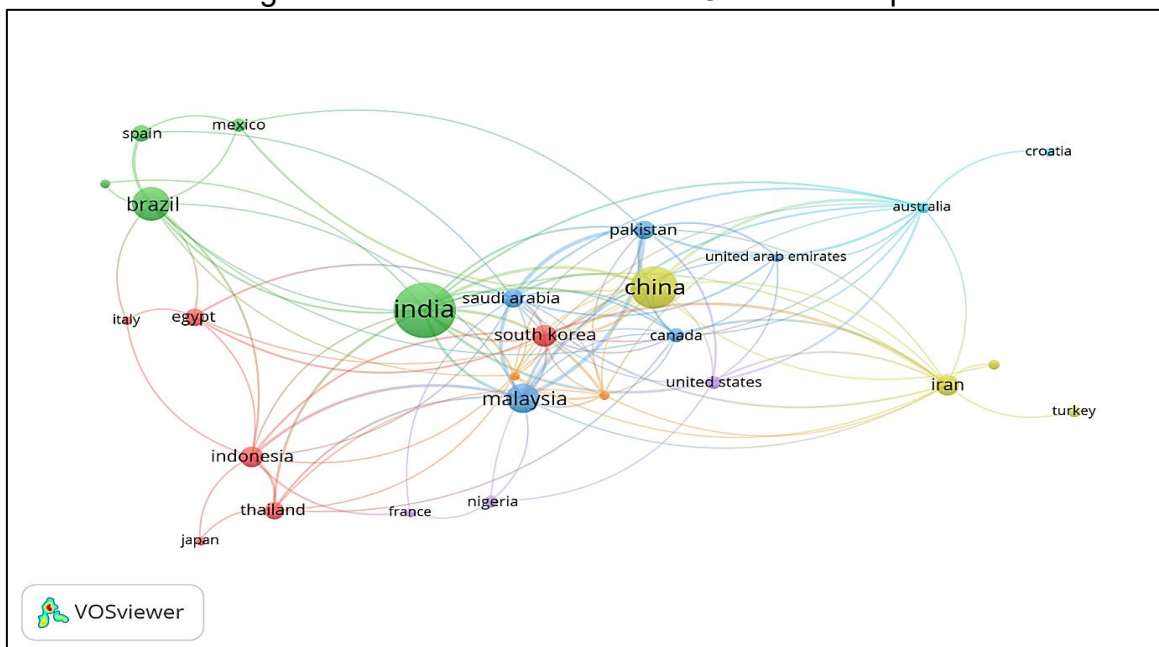
O quinto artigo mais citado é o "An overview on advancements in biobased transesterification methods for biodiesel production: Oil resources, extraction, biocatalysts, and process intensification Technologies". Foi publicado no periódico *Fuel* e escrito por Bhatia et al. (2021). O artigo apresenta uma visão geral sobre a produção de biodiesel e discute as diversas matérias-primas disponíveis, como óleos comestíveis, não comestíveis e óleos de cozinha usados. O foco principal recai sobre tecnologias de "base biológica", como o uso de enzimas imobilizadas e catalisadores derivados de biomassa, que são vantajosos por serem mais ecológicos e gerarem menos resíduos. O texto critica os métodos convencionais de produção por terem baixo rendimento, baixa pureza e serem demorados, apontando novas "tecnologias de intensificação de processo" (como microrreatores, micro-ondas e destilação reativa) como soluções para superar essas limitações.

Coautoria de países

Dos 65 países que foram analisados, 27 possuem colaboração entre eles e formaram 7 clusters, como mostrado na figura 3. O cluster vermelho representado por 6 países; verde por 5 países; azul com 5 países, amarelo com 4 países, roxo com 3 países, azul claro com 2 países e laranja com 2 países, sendo representado em cada cor dos clusters respectivamente, totalizando 7 clusters nessa rede de países. O cluster com maior círculo foi a Índia (verde) representando o país com maior número de publicações de documentos (99 documentos), seguido da China (66 documentos)

e do Brasil (45 documentos).

Figura 4 - Rede bibliométrica de Coautoria de países



Fonte: Própria (2025)

A Figura 4 mostra a distribuição geográfica global de publicações de documentos mais citados. Os 10 países que mais se destacaram com maior número de publicações foram: Índia, China, Brasil, Malásia, Coreia do Sul, Indonésia, Irã, Paquistão, Arábia Saudita e Egito.

A Índia e a China são os países mais populosos do mundo, possuem uma demanda crescente por energia e são altamente dependentes de petróleo. O fato deles liderarem os estudos que envolvem a produção de biodiesel e o uso catálise enzimática demonstra o interesse por meios de produção energética mais sustentável e também a preocupação de manter os dois países com fontes de energias alternativas ao petróleo. O Brasil sendo o terceiro país com maior número de publicações sobre o assunto e também o sétimo país mais populoso do mundo segue os mesmos desafios e preocupações que a Índia e China.

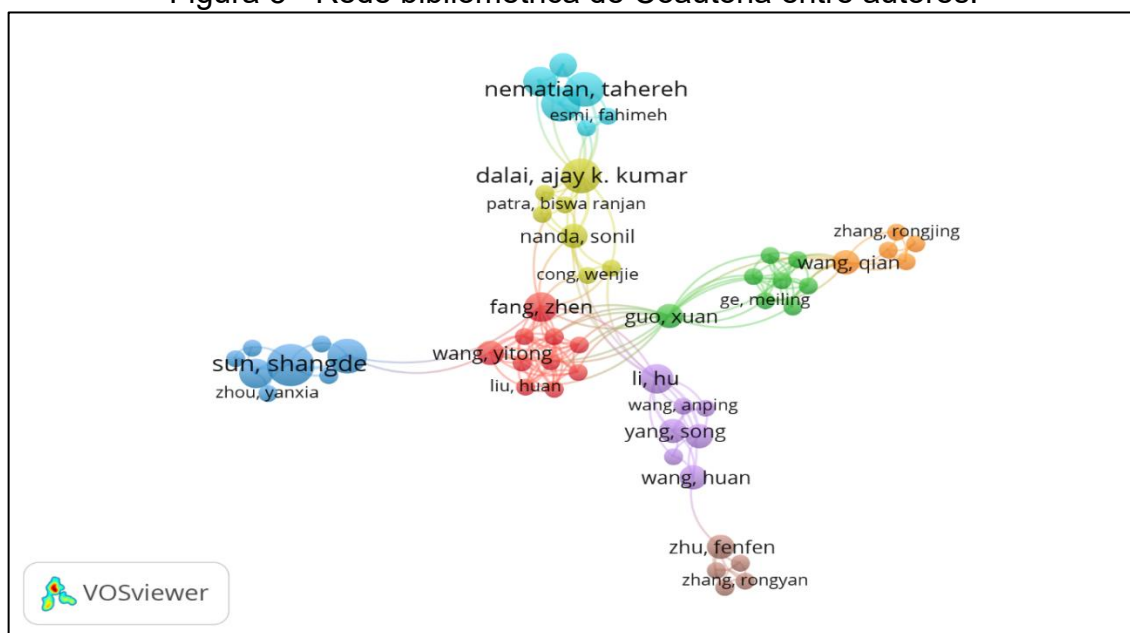
Análise de Coautoria entre autores

Para investigar as redes de colaboração científica, foi conduzida uma análise de coautoria. Esta análise foi desdobrada para identificar os pesquisadores mais influentes e suas conexões, foi estabelecido um número mínimo de 1 documento por autor com no mínimo 10 citações. O VOSviewer gerou redes que representam a colaboração entre os autores.

Dos 1.690 autores encontrados, 56 foram selecionados por terem no mínimo 1 documento com no mínimo 10 citações como mostra na figura 4. A rede bibliométrica mostra a coautoria dos autores com relação de citação entre eles, divididos em 8 clusters. Na rede bibliométrica o tamanho dos círculos representa o número de citações dos autores no período analisado de 2020 a 2025. Destacando-se o cluster em

vermelho com maior rede de colaboração de coautoria contendo relação com a temática, com 10 autores, seguido dos clusters verde e azul com 8 autores, clusters amarelo e roxo com 7 autores, cluster azul claro com 6 autores e clusters laranja e lilás com 5 autores.

Figura 5 - Rede bibliométrica de Coautoria entre autores.



Fonte: Própria (2025)

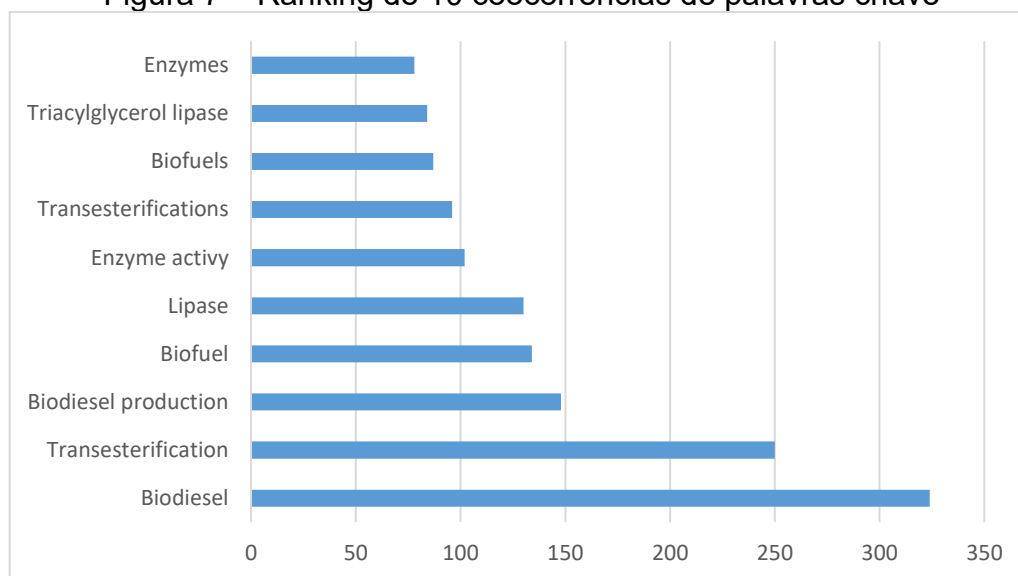
Na Tabela 2 está apresentado os 10 principais autores e suas respectivas instituições e países. Destaca-se o número de documentos publicados pelos autores com a temática abordada.

Tabela 2 – Principais autores e instituições e países

Autores	Nº de Documentos	Nº de Citações	País	Instituição
Sun, Shangde.	6	277	China	Henan University of Technology
Mumtaz, Muhammad	6	111	Paquistão	University of Gujrat
Wasseem Fernández - Lafuente, Roberto.	5	287	Espanha	CSIC - Instituto de Catálisis y Petroleoquímica
Zelic, Bruno.	5	114	Croácia	University North Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i Tehnologije
Sálic, Anita.	5	114	Croácia	The institution will open in a new tab
Touqeer, Tooba.	5	109	Paquistão	University of Gujrat
Mukhtar, Hamid	5	81	Paquistão	Government College University Lahore
				The institution will open in a new tab

biofuel,” onde também se encontram os métodos para sua geração, como “transesterification e esterification” assim, como como os processos de catálise enzimática como “enzymes, enzyme active, catalysis e Lipase”. Foi observado que a palavra “biodiesel” do cluster verde é a palavra com maior força, apresentando um total de 324 ocorrências, seguida pela palavra “transesterification” também do cluster verde com 250 ocorrências representando as palavras-chaves com maior relevância com a temática abordada como mostra na Figura 7.

Figura 7 – Ranking de 10 coocorrências de palavras chave



Fonte: Própria (2025)

Correlação de artigos com óleo de macaúba

Após os resultados da pesquisa inicial utilizando a string de busca “biodiesel AND transesterification AND enzymes”, também foi realizada uma pesquisa utilizando como filtro o termo “macaúba oil” para buscar artigos relacionando a produção de biodiesel via catálise enzimática utilizando óleo de macaúba como matéria prima. Dos 405 artigos obtidos da pesquisa inicial, apenas 1 artigo tem correlação com óleo de macaúba. O artigo intitulado “Development of a green integrated process for biodiesel esters production: Use of fermented macaúba cake as biocatalyst for macaúba acid oil transesterification” foi escrito por Ávila et al. 2021 e publicado no periódico JAOCS (Journal of the American Oil Chemists' Society). O estudo desenvolveu um novo processo verde integrado para a produção de ésteres de biodiesel, consistindo na transesterificação enzimática de óleo de macaúba catalisada por sólido fermentado seco (DFS) com atividade lipásica.

A pesquisa bibliométrica revelou uma escassez de produções científicas que abordem o uso do óleo de macaúba na produção de biodiesel com enzimas, revelando que essa é uma área ainda pouco explorada. No entanto o único estudo, publicado por Ávila et al. 2021, já mostrou um resultado bastante satisfatório. Isso sugere que a macaúba pode ser uma matéria-prima chave para processos de produção de biodiesel mais sustentáveis e economicamente viáveis.

Considerações Finais

Com base nas análises realizadas, observou-se o crescente interesse da comunidade científica na utilização de alternativas mais sustentáveis no processo de produção de biodiesel. Na análise bibliográfica foi possível verificar que os artigos destacaram o uso de enzimas como a lipase como sendo uma alternativa de fonte renovável para indústria, devido a sua eficiência no processo de catalização além de ser uma fonte que pode ser reutilizada no processo de transesterificação. De forma geral, o uso de enzimas, conforme empregada por alguns dos autores desse estudo, é uma prática inovadora que pode conciliar desenvolvimento econômico com sustentabilidade e tem grande potencial de uso na indústria energética.

Na análise bibliométrica, dos 405 documentos obtidos na base de dados Scopus, todos tinham no mínimo uma citação, dentre esses os cinco documentos com maior número de citações foram Koul et al. (2022), Mandari e Devarai (2022), Mathew et al. (2021), Zong et al. (2020) e Bhatia et al. (2021). As pesquisas científicas sobre a temática se concentram em cerca de 65 países com relação de coautoria, destacando-se a Índia com 99 publicações que abordam a temática. As palavras-chave com maior número de frequência para representar o tema central da pesquisa foram “biodiesel”, “transesterification”, “biodiesel production”, “biofuel” e “lipase”.

Com base no estudo, verificou-se que o uso de enzimas como uma opção renovável no processo de produção de biodiesel mostra-se importante. Foi possível concluir que a catálise enzimática é uma rota fundamental para tornar a produção de biodiesel mais sustentável. Por serem biocatalisadores, as enzimas minimizam a geração de resíduos tóxicos e subprodutos problemáticos, alinhando-se assim aos princípios da química verde. A capacidade de processar eficientemente matérias-primas de baixo custo e alta acidez, como óleos residuais, reforça o uso de enzimas como uma estratégia promissora para um biodiesel ecológico e economicamente viável. No entanto, é necessário que haja mais pesquisas que envolvam o uso do óleo de macaúba na produção de biodiesel através da catálise enzimática.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis. **Especificação do Biodiesel**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>. Acesso em: 20 out. 2025.

EMBRAPA. **Biodiesel**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Agroenergia. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel>. Acesso em: 20 out. 2025.

PASA, T.L.B. *et al.* Assessment of commercial acidic ion-exchange resin for ethyl esters synthesis from *Acrocomia aculeata* (Macaúba) crude oil. *Renewable Energy*. v. 146, 469-476, 2020.

SILVA, R.F. **Análise do consumo energético de um sistema de extração de óleo de macaúba**. Dissertação (Mestrado) – Curso do Programa de Pós-graduação em



Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2023a.

SILVA, M.P.F. **Síntese de biodiesel a partir do óleo de pequi através de biocatalizadores enzimáticos contendo Calb e Eversa® Transform 2.0 imobilizadas em nanopartículas magnéticas.** Dissertação (Mestrado) – Curso do Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB, Redenção, CE, 2023b.