

Julianno Pizzano Ayoub
Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira
Fabricio Hernandes de Freitas
(Orgs.)



BIOENERGIA

INOVAÇÃO, ENGENHARIA E SUSTENTABILIDADE



científica digital



CIENTÍFICA DIGITAL EDITORIAL LTDA

Barueri - São Paulo - Brasil
www.cientificadigital.org - contato@cientificadigital.org

Diagramação e Arte Edição © 2026 Científica Digital
Diego Santos Texto © 2026 Os Autores
Diogo Lima 1ª Edição - 2026
Imagens da Capa Acesso Livre - Open Access
Adobe Stock - 2026

© COPYRIGHT - TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. A editora detém os direitos autorais sobre a edição e o projeto gráfico, enquanto os autores mantêm os direitos autorais de seus respectivos textos. Esta obra está licenciada sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional, permitindo o download e compartilhamento integral ou parcial, desde que a fonte seja devidamente citada e os créditos atribuídos aos autores. É obrigatório que a obra permaneça em formato de Acesso Livre (Open Access), sem qualquer alteração. A catalogação em plataformas de acesso restrito ou com fins comerciais é estritamente proibida.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B615 Bioenergia: inovação, engenharia e sustentabilidade / Organização de Julianno Ayoub, Marcel Oliveira, Fabricio Hernandez De Freitas. – Barueri-SP: Científica Digital, 2026.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui Bibliografia
ISBN 978-65-6155-034-5
DOI 10.37885/978-65-6155-034-5

1. Energias renováveis – biocombustíveis e bioenergia.

CDD 621.312

Elaborado por Janaína Ramos – CRB-8/9166

Índice para catálogo sistemático:

I. XXXXXXXXXXXXXXXX

E-BOOK

ACESSO LIVRE ON LINE - IMPRESSÃO PROIBIDA

2026

Julianno Pizzano Ayoub
Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira
Fabricio Hernandes de Freitas
(Orgs.)

Bioenergia:
Inovação, Engenharia e Sustentabilidade

1ª EDIÇÃO



científica digital

2026 - BARUERI - SP

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. André Cutrim Carvalho
Prof. Dr. Antônio Marcos Mota Miranda
Prof^a. Ma. Auristela Correa Castro
Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Cordeiro
Prof. Dr. Carlos Alexandre Oelke
Prof^a. Dra. Caroline Nóbrega de Almeida
Prof^a. Dra. Clara Mockdece Neves
Prof^a. Dra. Claudia Maria Rinhel-Silva
Prof^a. Dra. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco
Prof. Dr. Cristiano Marins
Prof^a. Dra. Cristina Berger Fadel
Prof. Dr. Daniel Luciano Gevehr
Prof. Dr. Diogo da Silva Cardoso
Prof. Dr. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes
Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Prof^a. Dra. Fernanda Rezende
Prof. Dr. Flávio Aparecido de Almeida
Prof^a. Dra. Francine Náthalie Ferraresi Queluz
Prof^a. Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes
Prof. Dr. Humberto Costa

Prof. Dr. Joachin Melo Azevedo Neto
Prof. Dr. Jónata Ferreira de Moura
Prof. Dr. José Aderval Aragão
Prof. Me. Julianno Pizzano Ayoub
Prof. Dr. Leonardo Augusto Couto Finelli
Prof. Dr. Luiz Gonzaga Lapa Junior
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva
Prof^a. Dra. Maria Cristina Zago
Prof^a. Dra. Maria Otília Zangão
Prof. Dr. Mário Henrique Gomes
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes
Prof. Dr. Nelson J. Almeida
Prof. Dr. Pedro Afonso Cortez
Prof. Dr. Reinaldo Pacheco dos Santos
Prof. Dr. Rogério de Melo Grillo
Prof^a. Dra. Rosenery Pimentel Nascimento
Prof. Dr. Rossano Sartori Dal Molin
Prof. Me. Silvio Almeida Junior
Prof^a. Dra. Thays Zigante Furlan Ribeiro
Prof. Dr. Wescley Viana Evangelista
Prof. Dr. Willian Carboni Viana
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Acesse a lista completa dos Membros do Conselho Editorial em www.editoracientifica.com.br/conselho

Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra passaram por avaliação do Conselho Editorial e revisão por pares externos (*Peer Review*), recebendo a devida recomendação para publicação.

Nota: Esta obra é fruto de um processo colaborativo, configurando-se como uma coletânea na qual os direitos autorais permanecem resguardados para os respectivos autores. Alguns capítulos podem ter origem em trabalhos anteriormente apresentados em eventos acadêmicos; no entanto, os autores foram orientados a adotar o devido rigor na prevenção do autoplágio. A responsabilidade pelo conteúdo de cada capítulo, assim como pela originalidade e integridade das informações publicadas, é inteiramente dos respectivos autores e autoras. O conteúdo da obra não reflete, necessariamente, a opinião da editora, dos organizadores ou dos membros do conselho editorial.

APRESENTAÇÃO

Esta obra é fruto de um esforço colaborativo que reuniu professores, estudantes e pesquisadores cujo envolvimento enriqueceu significativamente as discussões neste espaço formativo. Além disso, resulta de iniciativas interinstitucionais e ações voltadas ao incentivo à pesquisa, congregando especialistas de diversas áreas do conhecimento, vinculados a Instituições de Educação Superior, públicas e privadas, em âmbito nacional e internacional.

Seu principal objetivo é fortalecer a integração entre instituições, tanto no Brasil quanto no exterior, por meio de redes de pesquisa comprometidas com a formação continuada de profissionais da educação. Para isso, busca-se a produção e a ampla disseminação do conhecimento em distintas áreas do saber.

Expressamos nossa profunda gratidão aos autores pelo empenho, comprometimento e dedicação na concepção e finalização desta obra. Esperamos que ela se consolide como um recurso didático-pedagógico valioso, atendendo às necessidades de estudantes, docentes de todos os níveis de ensino e demais interessados na temática.

Julianno Pizzano Ayoub

Marcel Oliveira

Fabricio Hernandes De Freitas

SUMÁRIO

Capítulo 01

PANORAMA DA PESQUISA SOBRE GENES DE RESISTÊNCIA EM BIODIGESTORES: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO DE TENDÊNCIAS E REDES DE COLABORAÇÃO

Leonardo Henrique de Almeida Moura; Rafaela de Campos Oliveira; Fabiano Bezerra Menegidio

 10.37885/251020379 8

Capítulo 02

PRÉ-TRATAMENTOS EM BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA: UM BREVE COMPARATIVO ENTRE ALCALINO E AUTO-HIDRÓLISE

Maria Mariana Oliveira Nunes; Fabrícia Vieira; Fabiane Maria Pereira Silva; Hortência Elucielly Pereira Santana; Ingrid Vieira Fernandes; Isadora Vieira Fernandes; Wesley Araújo Passos; Isabelly Pereira Silva; Daniel Pereira Silva; Denise Santos Ruzene

Capítulo 03

GESTÃO DOS RCC EM CANTEIROS DE OBRAS E PLANOS DE GERENCIAMENTO DE RCC EM CANTEIROS DE OBRAS

Luiz Paulo Vieira de Vieira de Araújo Júnior; Caio Dantas Gregolis

 10.37885/260121016 37

Capítulo 04

ADSORPTIVE REMOVAL OF ATRAZINE FROM AQUEOUS SOLUTION USING BIOCHAR DERIVED FROM *EUCALYPTUS SPP.* SAWDUST

Kevin Felipe Ramos

 10.37885/260321514 57

Capítulo 05

BRAZILIAN BIOFUELS OVERVIEW

Artur Saturnino Rodrigues; Adeline Cristina Pereira; Juan Pedro Bretas Roa; Vivian Machado Benassi

 10.37885/260421550 74

Capítulo 06**BIOTECHNOLOGICAL ADVANCES AND PROCESS OPTIMIZATION IN CORN
BASED BIOETHANOL PRODUCTION: ENHANCING YIELD, SUSTAINABILITY
AND INDUSTRIAL EFFICIENCY**

Nelson Raniery Barbosa Rodrigues; Thais Azevedo Costa; Tarcisio Michael Ferreira Soares de
Oliveira; Vivian Machado Benassi; Juan Pedro Bretas Roa

 10.37885/260421663 **103**

SOBRE OS ORGANIZADORES **121**

ÍNDICE REMISSIVO **123**

PANORAMA DA PESQUISA SOBRE GENES DE RESISTÊNCIA EM BIODIGESTORES: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO DE TENDÊNCIAS E REDES DE COLABORAÇÃO

Leonardo Henrique de Almeida Moura

Universidade de Mogi das Cruzes (UMC)

Rafaela de Campos Oliveira

Universidade de Mogi das Cruzes (UMC)

Fabiano Bezerra Menegidio

Universidade de Mogi das Cruzes (UMC)

RESUMO

Objetivo: Este estudo propõe uma análise bibliométrica e de redes de colaboração com o objetivo de mapear a paisagem científica da pesquisa sobre genes de resistência (GR) em biodigestores. A crescente preocupação com a disseminação de GR em sistemas ambientais, incluindo o efluente de biodigestores, torna urgente a compreensão da dinâmica e das tendências dessa área de pesquisa. Utilizando as bases de dados acadêmicas Scopus, Web of Science e SciELO, este projeto irá quantificar a produção científica, identificar os principais atores, instituições e países, e analisar os conexos temáticos através da coocorrência de palavras-chave. As análises de rede serão conduzidas utilizando o software VOSViewer para visualizar as redes de coautoria, cocitação e acoplamento bibliográfico. O estudo busca responder a perguntas-chave, como: a evolução temporal da pesquisa; a formação de clusters temáticos; as redes de colaboração entre autores e instituições; os artigos e periódicos mais influentes. A identificação de lacunas na literatura e de temas emergentes será utilizada para propor recomendações de pesquisa, contribuindo para uma melhor gestão dos riscos associados à disseminação de GR e para o avanço do conhecimento em saneamento ambiental e biotecnologia.

Palavras-chave: Genes de resistência a antibióticos; digestão anaeróbia; análise bibliométrica; rede de colaboração; microbioma.

INTRODUÇÃO

A resistência à antimicrobianos (RAM) foi classificada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como uma das maiores ameaças globais à saúde pública e ao desenvolvimento, sendo responsável direta por aproximadamente 1,27 milhão de mortes em 2019 e contribuindo para 4,95 milhões de óbitos no mesmo período. (Murray *et al.*, 2022), que estima que milhões de mortes anuais estejam associadas a infecções resistentes e alerta para o risco crescente de que tratamentos eficazes tornem-se escassos ou ineficazes nos próximos anos (Ahmed *et al.*, 2024; Prestinaci; Pezzotti; Pantosti, 2015). O problema é intensificado pelo uso indiscriminado de antibióticos em humanos, animais e atividades agrícolas, o que favorece a seleção e disseminação de genes de resistência em múltiplos ambientes (Ahmed *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2022) — desde sistemas de saúde e produção animal até águas superficiais, solos agrícolas e efluentes industriais (Graham *et al.*, 2016). Relatos científicos confirmam que genes de resistência, como bla-TEM, ampC e tetA, têm sido detectados em águas residuais, lodos de tratamento e solos que recebem resíduos contaminados (Graham *et al.*, 2016; Waško *et al.*, 2022), tornando-se fontes potenciais de transferência desses genes para microrganismos patogênicos e para a cadeia alimentar (Verraes *et al.*, 2013).

Nesse cenário, os biodigestores anaeróbicos ganham destaque como tecnologias essenciais para tratamento sustentável de resíduos e geração de biogás, alinhados à economia circular e redução de impactos ambientais. (Piadeh *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2022) Apesar dos benefícios, resíduos oriundos de sistemas que empregam antimicrobianos podem carregar microrganismos resistentes (Wang *et al.*, 2025), viabilizando a preservação e dispersão de GRAs mesmo após o processo de digestão anaeróbia. (Wang *et al.*, 2025) Estudos apontam para a detecção de GRAs tanto no efluente quanto no digestato produzido, indicando que os biodigestores podem funcionar como reservatórios e vetores desses genes em sistemas agrícolas (Lima; Domingues; Da Silva, 2020).

A integração do conceito de Saúde Única (“One Health”) ressalta a urgência de se compreender como os GRAs circulam entre ambiente, animais e humanos, promovendo estratégias globais de monitoramento, biossegurança e uso criterioso de antimicrobianos. Assim, o presente estudo objetiva mapear e

analisar a produção científica acerca da prevalência e dos mecanismos de transferência de GRAs em biodigestores anaeróbicos, contribuindo para a formulação de políticas e práticas que minimizem riscos ambientais e de saúde pública.

MÉTODOS

A presente revisão bibliométrica foi conduzida com o objetivo de mapear a produção científica, as tendências e as redes de colaboração relacionadas a genes de resistência (GRs) em biodigestores, com um recorte temporal de 2015 a 2025.

Fontes de Dados e Estratégia de Busca

A coleta de dados foi realizada em setembro de 2025 utilizando as bases de dados bibliográficas Scopus (Elsevier), Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics) e SciELO (Scientific Electronic Library Online), visando uma cobertura abrangente da literatura global e regional. As "strings" de busca foram aplicadas nos campos de título, resumo e palavras-chave, com os seguintes termos:

Para Scopus e Web of Science: "(TITLE-ABS-KEY ("anaerobic digestion" OR biodigester* OR biogas OR "anaerobic reactor" OR "anaerobic digester" OR bioreactor*)) AND (TITLE-ABS-KEY ("antibiotic resistance gene*" OR ARG* OR "resistance gene*" OR "antimicrobial resistance"))". (Nota: Para a Web of Science, utilizou-se o campo equivalente "TS=").

Para SciELO: `("anaerobic digestion" OR biodigester* OR biogas OR "anaerobic reactor" OR "anaerobic digester" OR bioreactor*) AND ("antibiotic resistance gene*" OR ARG* OR "resistance gene*" OR "antimicrobial resistance")`.

Triagem, Unificação e Tratamento dos Dados

A busca foi restrita a documentos do tipo Artigo (*Article*) e Revisão (*Review*). Os registos resultantes foram exportados em formato ".RIS", incluindo os campos *Authors*, *Title*, *Year*, *Source*, *Title*, *Affiliations*, *Abstract*, *Author*, *Keywords*, *Indexed Keywords* e *References*.

Os ficheiros exportados foram processados num ambiente Google Colab, utilizando um script em linguagem *Python* importando uma biblioteca *rispy*. Este procedimento automatizado realizou a unificação de todos os registos numa única base de dados consolidada. Em seguida, foi aplicado um algoritmo de remoção de duplicatas com critério hierárquico: os artigos foram identificados como duplicados se partilhassem o mesmo DOI (*Digital Object Identifier*) e, para os registos sem DOI, a identificação foi feita com base no título do artigo. Este processo garantiu que cada publicação estivesse representada apenas uma vez na base de dados final, resultando em 2035 artigos para análise.

Análise Bibliométrica e Visualização

A análise quantitativa e a visualização das redes foram realizadas com o software *VOSviewer* (versão 1.6.20) (van Eck; Waltman, 2010). Para aumentar a precisão da análise de coocorrência de palavras-chave, foi realizado um refinamento terminológico através da exclusão de termos genéricos, como palavras-chave excessivamente metodológicas ou geográficas (ex: "*article*", "*human*", "*nonhuman*", "*comparative analysis*", "*priority journal*", "*china*"). Este passo foi fundamental para evitar a formação de clusters pouco informativos e permitir que a estrutura temática real da área de investigação emergisse com maior clareza.

Foram empregadas as seguintes abordagens de análise

Coautoria (Co-authorship): Utilizada para mapear as redes de colaboração entre autores, instituições e países, com um limiar mínimo de 10 documentos por autor.

Coocorrência (Co-occurrence): Aplicada às palavras-chave dos autores para identificar os clusters temáticos, com um limiar mínimo de 20 ocorrências para a inclusão de uma *keyword*.

Os mapas bibliométricos gerados foram exportados em formato *Portable Network Graphic* (.PNG). A interpretação dos resultados fundamentou-se numa

abordagem mista, que integrou a análise de indicadores quantitativos à avaliação qualitativa da estrutura temática e das redes de colaboração.

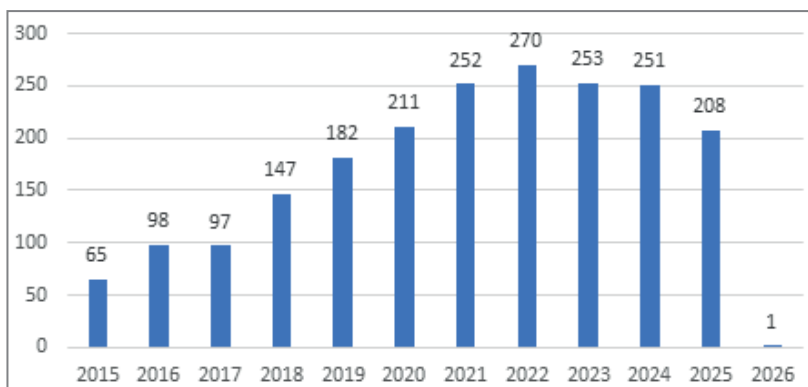
RESULTADOS

Fluxo de Seleção dos Estudos e Produção Científica Anual

A busca inicial nas três bases de dados resultou em 5.205 registros. Após a aplicação dos critérios de inclusão (artigos e revisões), 3.016 trabalhos foram considerados elegíveis para exportação. A etapa de remoção de duplicatas consolidou a base de dados em 2.035 publicações únicas, que foram utilizadas para a análise.

A distribuição temporal destes artigos, entre 2015 e 2025, revela que os anos de 2021 ($n = 252$), 2022 ($n = 270$) e 2023 ($n = 253$) concentraram o maior volume de publicações, indicando um pico de atividade científica recente na área (Figura 1).

Figura 1 - Gráfico de produção científica anual.



Fonte: Autor (2025).

Análise Temática da Produção Científica

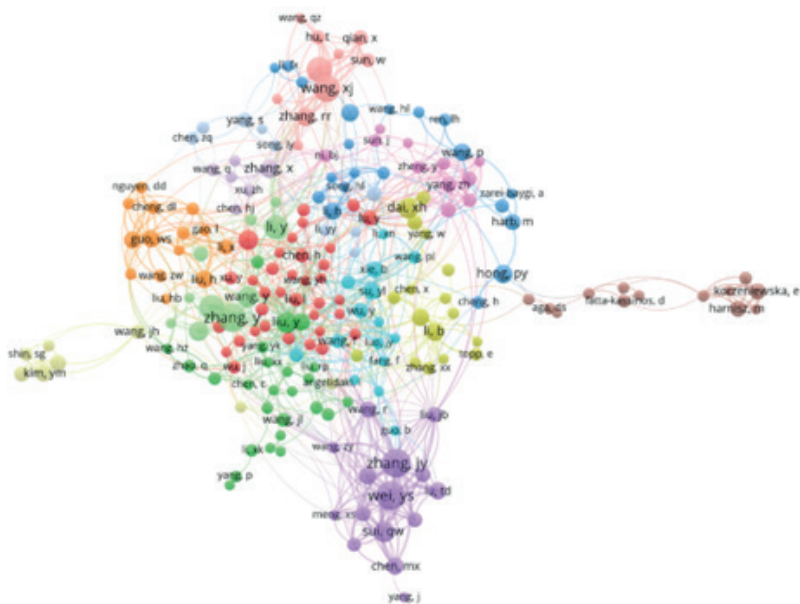
A análise de coocorrência, com um limiar mínimo de 20 ocorrências, resultou numa rede de 259 palavras-chave, organizada em 6 clusters temáticos

principais. Os termos *nitrogen*, *antibiotic resistance*, *wastewater*, *anaerobic digestion* e *bioreactors* funcionaram como os nós centrais dos *clusters* (Figura 2).

- O *cluster* vermelho evidenciou a ênfase nos substratos de origem agropecuária (*manure*, *swine manure*) e no processo da Digestão Anaeróbica.
- O *cluster* lilás agrupou termos relacionados ao tratamento de efluentes urbanos (*sewage sludge*, *wastewater treatment*).
- O *cluster* azul representou o núcleo temático de *antibiotic* e *antibiotic resistance*.
- O *cluster* amarelo focou-se nos produtos e na remoção de nutrientes, como *nitrogen* e *nitrogen removal*.
- O *cluster* verde agrupou os termos relacionados aos *bioreactors* em geral.
- O *cluster* ciano destacou o *tetracycline* como um dos antibióticos mais estudados.

Os termos *antibiotic resistance genes* e *microbial community* funcionaram como conectores transversais entre os diferentes *clusters*.

Figura 3 - Mapa de coautoria com (A) >5 publicações e (B) >10 publicações.



(A)



(B)

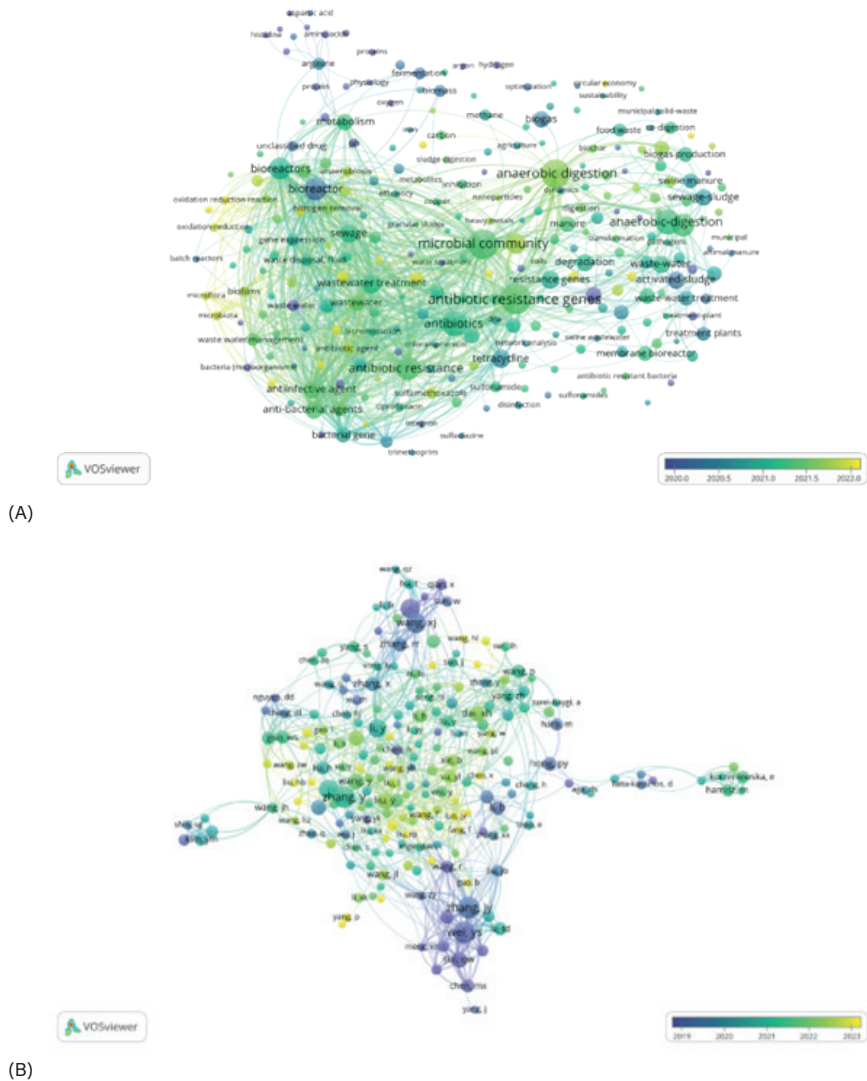
Fonte: Autor (2025).

Evolução Temporal da Pesquisa

A análise de sobreposição temporal (overlay) demonstra uma clara transição no foco da pesquisa. O mapa de coocorrência (Figura 4A) indica que os termos mais frequentes surgiram predominantemente entre 2020 e 2022, com um pico de atividade entre 2021.0 e 2021.5. A rede de autores (Figura 4B) reflete esta tendência, revelando a presença de investigadores pioneiros (nós

em tons de azul) e uma notável quantidade de autores com produção recente (nós em tons de amarelo), concentrados em clusters de colaboração específicos.

Figura 4 - Mapa de sobreposição temporal com (A) cocorrência e (B) coautoria.



DISCUSSÃO

A presente análise bibliométrica revela um panorama detalhado da pesquisa sobre genes de resistência (GRs) em biodigestores, destacando um campo científico em rápida maturação e com uma estrutura bem definida. Os resultados demonstram não apenas um crescimento quantitativo, mas uma evolução qualitativa impulsionada por avanços tecnológicos e pela crescente urgência global em torno da resistência antimicrobiana (RAM).

A trajetória da produção científica, com um pico acentuado entre 2021 e 2023, reflete uma mudança fundamental no foco da investigação. A análise temporal (Figura 4) ilustra uma transição clara dos termos fundacionais da área, como *anaerobic digestion* e *wastewater*, para tópicos emergentes como *metagenomics* e *mobile genetic elements*. Isso indica que o campo amadureceu: a comunidade científica moveu-se de uma abordagem de engenharia de processos, focada em otimizar o funcionamento dos biodigestores, para uma investigação molecular profunda. A questão deixou de ser se os biodigestores são relevantes no contexto dos GRs, para ser como e porquê estes sistemas funcionam como “hotspots” para a disseminação da resistência a nível genético. Essa transição foi catalisada pela popularização de ferramentas de Sequenciamento de Nova Geração (NGS), que permitiram aos pesquisadores analisar o “resistoma” — o conjunto completo de genes de resistência — diretamente de amostras ambientais complexas.

A estrutura temática, visualizada no mapa de coocorrência (Figura 2), mostra que a pesquisa se organiza em torno de grandes áreas de aplicação, principalmente o tratamento de dejetos agropecuários (cluster vermelho) e de efluentes urbanos (cluster lilás). Embora representem contextos distintos, a forte conexão entre eles por meio de termos centrais como *antibiotic resistance genes* e *microbial community* demonstra que os desafios e as ferramentas de análise são comuns a ambos os setores. Essa estrutura espelha o conceito de “Saúde Única” (One Health), que reconhece a interconexão entre a saúde humana, animal e ambiental no combate à RAM. A centralidade do cluster azul, focado nos mecanismos de resistência, reforça que a dimensão microbiológica é o elo que une todas as frentes de investigação, com um interesse profundo

em compreender não apenas os genes presentes, mas também o seu potencial de mobilidade.

A dinâmica de colaboração (Figura 3) sugere uma estrutura social de “núcleo-periferia”, característica de um campo em expansão. A existência de um grande componente de autores altamente conectados, especialmente no filtro de 10 publicações, indica a presença de grupos de investigação consolidados que lideram a produção de alto impacto. Ao mesmo tempo, a presença de múltiplos clusters menores e independentes revela que o campo é dinâmico e atrai constantemente novos pesquisadores de áreas complementares, como bioinformática e biologia molecular. Essa interdisciplinaridade é essencial para analisar os complexos conjuntos de dados gerados pelas tecnologias de NGS e para traduzir os achados ambientais em conhecimento relevante para a saúde pública.

Apesar do rápido crescimento, a análise aponta lacunas importantes. A proeminência do tetracycline (cluster ciano) sugere um viés temático, possivelmente em detrimento de outros antibióticos clinicamente mais urgentes, como os carbapenemos. Além disso, o domínio de metagenomics indica um foco na identificação de genes, mas não necessariamente na sua atividade ou taxa de transferência real, que são cruciais para uma avaliação de risco precisa. Futuras pesquisas devem, portanto, alinhar a vigilância ambiental com as prioridades clínicas e avançar de estudos de potencial (o que está presente) para estudos de funcionalidade (o que está ativo), otimizando os biodigestores não apenas como reatores de bioenergia, mas como barreiras de controle eficazes na luta contra a disseminação da resistência antimicrobiana.

Limitações do Estudo

É importante reconhecer as limitações inerentes a esta análise bibliométrica para garantir uma interpretação crítica e equilibrada dos resultados. O estudo limitou-se às bases de dados Scopus, Web of Science e SciELO, o que pode não ter capturado a totalidade da literatura relevante, especialmente artigos publicados em outras bases de dados, periódicos regionais não indexados ou em idiomas que não o inglês, introduzindo um potencial viés geográfico e linguístico. Adicionalmente, a análise de coocorrência de palavras-chave

depende da qualidade e consistência dos termos fornecidos pelos autores dos artigos originais. A variabilidade na escolha de palavras-chave pode influenciar a formação e a interpretação dos clusters temáticos. Embora esta metodologia seja excelente para identificar padrões e tendências gerais, como demonstrado, ela oferece uma visão de alto nível e não substitui uma revisão sistemática do conteúdo completo dos artigos.

CONCLUSÃO

A análise bibliométrica evidencia que a pesquisa sobre genes de resistência em biodigestores, além de consolidada na monitorização de diferentes substratos, como dejetos agropecuários e efluentes urbanos, encontra-se em franca expansão rumo à compreensão dos mecanismos moleculares da disseminação da resistência, impulsionada por ferramentas como a metagenômica. Estes resultados reforçam o papel estratégico dos biodigestores na abordagem “One Health”, consolidando-os não apenas como uma tecnologia de bioenergia dentro da economia circular, mas também como um ponto de controle crítico no combate à resistência antimicrobiana.

REFERÊNCIAS

- AHMED, Sirwan Khalid *et al.* Antimicrobial resistance: Impacts, challenges, and future prospects. **Journal of Medicine, Surgery, and Public Health**, v. 2, p. 100081, 1 abr. 2024.
- AJULO, Samuel; AWOSILE, Babafela. Global antimicrobial resistance and use surveillance system (GLASS 2022): Investigating the relationship between antimicrobial resistance and antimicrobial consumption data across the participating countries. **PLOS ONE**, v. 19, n. 2, p. e0297921, 5 fev. 2024.
- GRAHAM, David W. *et al.* Appearance of β -lactam Resistance Genes in Agricultural Soils and Clinical Isolates over the 20th Century. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 21550, 16 fev. 2016.
- LIMA, Tiago; DOMINGUES, Sara; DA SILVA, Gabriela Jorge. Manure as a Potential Hotspot for Antibiotic Resistance Dissemination by Horizontal Gene Transfer Events. **Veterinary sciences**, v. 7, n. 3, 13 ago. 2020.
- MURRAY, Christopher J. L. *et al.* Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. **The Lancet**, v. 399, n. 10325, p. 629–655, 12 fev. 2022.

PIADEH, Farzad *et al.* A critical review for the impact of anaerobic digestion on the sustainable development goals. **Journal of Environmental Management**, v. 349, p. 119458, 1 jan. 2024.

PRESTINACI, Francesca; PEZZOTTI, Patrizio; PANTOSTI, Annalisa. Antimicrobial resistance: a global multifaceted phenomenon. **Pathogens and Global Health**, v. 109, n. 7, p. 309–318, 3 out. 2015.

SINGH, Puneet Kumar *et al.* Food Waste Valorisation for Biogas-Based Bioenergy Production in Circular Bioeconomy: Opportunities, Challenges, and Future Developments. **Frontiers in Energy Research**, v. Volume 10-2022, 2022.

VERRAES, Claire *et al.* Antimicrobial resistance in the food chain: a review. **International journal of environmental research and public health**, v. 10, n. 7, p. 2643–2669, 28 jun. 2013.

WANG, Chunxiao *et al.* Antibiotic resistance genes in anaerobic digestion: Unresolved challenges and potential solutions. **Bioresource technology**, v. 419, p. 132075, mar. 2025.

WAŚKO, Izabela *et al.* Clinically Relevant β -Lactam Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants. **International journal of environmental research and public health**, v. 19, n. 21, 24 out. 2022.

XU, Chunming *et al.* A Review of Current Bacterial Resistance to Antibiotics in Food Animals. **Frontiers in Microbiology**, v. Volume 13-2022, 2022.

PRÉ-TRATAMENTOS EM BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA: UM BREVE COMPARATIVO ENTRE ALCALINO E AUTO-HIDRÓLISE

Maria Mariana Oliveira Nunes

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Fabrcia Vieira

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Fabiane Maria Pereira Silva

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Hortência Elucielly Pereira Santana

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Ingrid Vieira Fernandes

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Isadora Vieira Fernandes

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Wesley Araújo Passos

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Isabelly Pereira Silva

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Daniel Pereira Silva

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Denise Santos Ruzene

Universidade Federal de Sergipe (UFS)

RESUMO

Diante da crescente necessidade de substituir os combustíveis fósseis, o uso de biomassa como matéria-prima destaca-se como uma alternativa relevante e promissora. Entretanto, devido à recalcitrância estrutural, a exploração da biomassa ainda depende do desenvolvimento de pré-tratamentos capazes de aumentar a viabilidade desse material para uma ampla gama de aplicações. Com esse propósito, essa revisão delineou um panorama abrangente de alguns dos pré-tratamentos existentes, analisando suas características e aplicações em biomassa lignocelulósica. Assim, como principal objetivo foi realizada a comparação dos métodos de pré-tratamento auto-hidrólise e alcalino, permitindo uma análise detalhada de seus aspectos fundamentais, como princípios de funcionamento, eficiência, vantagens e limitações. Adicionalmente, foram discutidas possíveis perspectivas para a otimização desses métodos, visando aprimorar sua aplicação e desempenho.

Palavras-chave: pré-Tratamento; Alcalino; Auto-Hidrólise; Biomassa Lignocelulósica.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crise energética, impulsionada pela crescente demanda e pela finitude dos combustíveis fósseis, tem se consolidado como uma das principais preocupações mundiais, de modo que se tornou imprescindível a busca por novas alternativas para geração de energia. A substituição de combustíveis fósseis amplamente utilizados emerge como uma necessidade urgente, abrindo espaço para a discussão acerca de matérias-primas sustentáveis, como a biomassa lignocelulósica. Em vista disso, diversas pesquisas têm sido realizadas para a aplicação da biomassa como matéria-prima para biocombustíveis e produtos químicos. No entanto, para viabilizar sua conversão, pré-tratamentos têm sido empregados (Adnan *et al.*, 2025; Zhong *et al.*, 2021) e avaliados quanto sua eficácia na despolimerização da biomassa (Latif *et al.*, 2022).

A biomassa lignocelulósica, constituída por material orgânico renovável como resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais, destaca-se como uma alternativa promissora, devido à sua abundância e ao seu potencial na redução de emissões de carbono (Hayes, 2013). No entanto, para que a biomassa seja eficientemente convertida em bioprodutos, é crucial despolimerizar sua complexa matriz lignocelulósica, composta predominantemente por celulose, hemiceluloses e lignina. Nesse contexto, os processos de pré-tratamento são fundamentais, pois facilitam o fracionamento do material em suas frações lignocelulósicas, possibilitando por exemplo a liberação de açúcares fermentáveis, obtenção de polpa celulósica, remoção de lignina para obtenção de químicos, entre outras aplicações (Nitsos *et al.*, 2013; Vieira *et al.*, 2024).

Em vista do interesse em explorar os componentes lignocelulósicos como matéria-prima alternativa, a aplicação de pré-tratamento em biomassa lignocelulósicas é amplamente investigada e diversificada. Ruzene *et al.* (2007), por exemplo, exploraram o pré-tratamento alcalino para a extração de hemiceluloses a partir da palha de trigo e obtiveram rendimento de 17,3% de hemicelulose (em % da matéria-prima seca), correspondendo à dissolução de 49,3% da hemicelulose original. O processo foi realizado com solução alcalina de NaOH, nas condições de 0,50 mol/L de hidróxido de sódio a 55°C por 2 h. Zhong *et al.* (2021) investigaram o fracionamento lignocelulósico, em especial da lignina e da celulose, a partir de resíduo de sabugo de milho usando um sistema

metanol/água com catalisador alcalino. Os autores indicaram como condição ideal 100°C por 1 h, com metanol/água (65/35 v/v) e NaOH entre 0,25% e 2% (m/m). A recuperação de celulose variou de 78,9% a 62,5%, enquanto a remoção de lignina aumentou de 36,6% a 64,3% conforme a concentração de NaOH.

Muthuvelu *et al.* (2019) observaram que o pré-tratamento alcalino assistido por ultrassom favoreceu a hidrólise enzimática da biomassa lignocelulósica, aumentando o teor de celulose em mais de 50% em todas as biomassas testadas. O maior aumento foi no algodão-bravo (*Ipomoea carnea*), com 71,27±0,19% de celulose e remoção de lignina de 19,61±0,89%. As demais biomassas também apresentaram aumento de celulose: cana-de-açúcar (58,73±0,25%), cana-do-reino (66,15±0,03%) e taboa (60,24±0,07%), com remoção de lignina de 20,58±0,27%, 17,04±0,57% e 13,75±0,14%, respectivamente.

Megala, Rekha e Saravanathamizhan (2020) avaliaram pré-tratamentos ácido, ultrassônico e com solvente eutético em resíduos de algodão têxtil, observando a degradação da lignina e o aumento de celulose nas polpas obtidas após cada pré-tratamento. No pré-tratamento ácido, ao elevar a concentração de H₂SO₄ de 1% para 5% ocorreu a redução da lignina de 0,242 g para 0,069 g e o aumento da celulose de 0,456 g para 0,793 g. Com ultrassom, estender o tempo de 3 h para 9 h reduziu a lignina de 0,229 g para 0,074 g e elevou a celulose de 0,491 g para 0,776 g. No tratamento com solvente eutético, alterar a razão biomassa:solvente de 1:1 para 1:2 reduziu a quantidade de lignina de 0,231 g para 0,190 g e aumentou a celulose de 0,514 g para 0,651 g.

Ao utilizar biomassa da palha de trigo, Ilanidis *et al.* (2021) analisaram a ação do pré-tratamento de auto-hidrólise com ou sem catalisador a base de ácido sulfúrico sob condições variáveis de 160, 175, 190 e 205°C. Foram obtidos rendimentos de lignina de 31,6±0,4% para o pré-tratamento auto-catalisado (sem catalisador) a 190°C e de 32,7±0,4% para o pré-tratamento catalisado por ácido sulfúrico. Adicionalmente, observou-se que um pequeno incremento na temperatura teve maior influência no pré-tratamento do que a adição de ácido sulfúrico.

Diante desse contexto e com a finalidade de ampliar o conhecimento sobre o reaproveitamento da biomassa lignocelulósica pré-tratada, para a conversão em bioprodutos de maior valor agregado, o presente estudo teve como principal objetivo realizar uma análise comparativa entre os métodos de

pré-tratamento alcalino e auto-hidrólise. Para isso, foram avaliados os princípios de funcionamento, a eficiência na despolimerização das frações lignocelulósicas, bem como suas vantagens e limitações, destacando o potencial de cada método para otimizar o aproveitamento da biomassa.

BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

O termo “biomassa” refere-se, de maneira abrangente, à matéria de origem vegetal e animal, incluindo resíduos biodegradáveis, empregada na geração de energia e na obtenção de bioprodutos (Hayes, 2013). Entre os bioprodutos derivados da biomassa, destacam-se biocombustíveis, como etanol e biodiesel (Demirbas, 2008), biogás, bioplásticos, biofertilizantes, e produtos químicos de base biológica, como ácidos orgânicos e solventes (Corato *et al.*, 2018), que têm aplicação em diversas indústrias, contribuindo para a redução da dependência de recursos fósseis e a mitigação dos impactos ambientais.

Em particular, o conceito de biomassa vegetal abrange uma vasta gama de materiais, como resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais, sendo um recurso fundamental na busca por fontes renováveis e sustentáveis (Hayes, 2013). A biomassa apresenta um grande potencial como fonte renovável de energia, o que garante que esteja cada vez mais em pauta em pesquisas e estudos que buscam explorar sua composição e aplicabilidade.

A biomassa é constituída essencialmente por três componentes lignocelulósicos: celulose, hemiceluloses e lignina, além disso, apresenta porcentagens usualmente menores de outros componentes, como cinzas e extrativos (Zheng *et al.*, 2017). As hemiceluloses e a celulose são predominantemente compostas por carboidratos, que desempenham um papel fundamental na formação da estrutura da biomassa. A celulose, envolvida pelas hemiceluloses e lignina, é o composto orgânico mais abundante na natureza e possui uma estrutura predominantemente cristalina formada por unidades de D-glicose. A lignina é um composto amorfo e rígido, sendo responsável por conferir resistência e proteção à estrutura da biomassa. As hemiceluloses, por sua vez, apresentam uma estrutura menos ordenada quando comparada à celulose e são caracterizadas por uma maior diversidade de monossacarídeos em sua composição (Hayes, 2013; Yousuf; Pirozzi; Sannino, 2020).

Esses componentes estão presentes em todos os materiais lignocelulósicos, porém, sua distribuição varia entre os diferentes tipos de biomassa lignocelulósica. Mesmo considerando a mesma espécie vegetal, são observadas variações na composição desses componentes. Essas diferenças podem influenciar o processo de degradação da biomassa e do produto a ser obtido (Bensalah *et al.*, 2021).

Apesar de compartilharem uma estrutura comum, as biomassas apresentam características distintas que permitem classificá-las em diferentes categorias, geralmente baseadas em sua origem: lenhosas, não-lenhosas e gramíneas. Como exemplo das lenhosas, destacam-se resíduos, tais como serragem, cascas, lascas e galhos de madeira; por sua vez, as não lenhosas abrangem resíduos de campos e de processos agrícolas, como palha, bagaço de cana-de-açúcar e casca de arroz. As gramíneas destacam espécies como *Panicum virgatum* (switchgrass), *Miscanthus giganteus* (miscanthus), *Phalaris arundinacea* (capim-amarelo) e *Saccharum officinarum* (cana-de-açúcar) (Ruzene *et al.*, 2007; Sadhukhan *et al.*, 2019; Shinnars; Digman; Ronge, 2011).

PRÉ-TRATAMENTOS

De acordo com a composição química da biomassa, sua empregabilidade pode ser direcionada para diferentes aplicações, assim como podem ser utilizados pré-tratamentos mais adequados que favoreçam a quebra de sua estrutura, liberando componentes, como açúcares e outros compostos, os quais podem ser empregados diretamente ou transformados em produtos químicos (Hayes, 2013). De forma demonstrativa, é possível observar que a biomassa com maior porcentagem de celulose e hemiceluloses em sua composição tende a apresentar maior rendimento de etanol, sendo, portanto, mais vantajosa a sua utilização para esse fim. Por outro lado, nota-se que, na presença de uma maior proporção de lignina, é mais viável que a biomassa seja empregada na geração de energia (Sadhukhan *et al.*, 2019). Essas tendências implicam na diversidade de aplicações dos pré-tratamentos e na necessidade de estudos integrados à composição da biomassa, visando maior adequação aos contextos específicos.

Os métodos de pré-tratamento podem ser classificados como biológicos, físicos, químicos ou uma combinação destes, com a escolha adequada

dependendo do nível de separação requerido e dos objetivos específicos determinados (Capek-Ménard *et al.*, 1992). O pré-tratamento biológico tem como princípio de funcionamento a utilização de microorganismos, como fungos ou bactérias, com a função de secretar substâncias capazes de quebrar as frações da biomassa (Ying *et al.*, 2024). O estudo realizado por Ying *et al.* (2024) apontou o potencial deste tipo de pré-tratamento, mostrando uma taxa de 34,3% de degradação utilizando a espécie do fungo *Cerrena unicolor* e comprovando modificações nas superfícies e na estrutura da biomassa.

No pré-tratamento físico, assim como no biológico, não são utilizados compostos químicos para atingir os resultados desejados. Esse processo resulta na redução do tamanho da biomassa por meio de operações físicas, como moagem e extrusão, o que aumenta a área superficial e facilita interações mais eficientes em etapas posteriores de processamento (Lu *et al.*, 2022; Sant'Ana Júnior *et al.*, 2025). Enquanto o pré-tratamento químico consiste na quebra das ligações dos componentes da matriz lignocelulósica, mediante o uso de solventes ácidos, alcalinos ou líquidos iônicos, entre outros (Nitsos *et al.*, 2013).

Os tipos de pré-tratamentos químicos mais usuais são o ácido, alcalino e organosolv. No pré-tratamento organosolv, compostos orgânicos como etileno-glicol, metanol, etanol e acetona são comumente usados para despolimerizar a biomassa em uma fração sólida concentrada em celulose e outra fração líquida rica em lignina e hemiceluloses (Moniz *et al.*, 2015; Saravanan *et al.*, 2023). Além disso, esse pré-tratamento pode ser combinado com outros métodos para otimizar o processo e aumentar o aproveitamento dos produtos, como mostrado por Moniz *et al.* (2015). Os autores combinaram os pré-tratamentos auto-hidrólise e organosolv em condições brandas para recuperar hemiceluloses e lignina solubilizada de palha de arroz, avaliando diferentes tempos de reação e concentrações de etanol presentes no método organosolv. No estudo foi obtido um rendimento de 41,69% de deslignificação e 41% de hemiceluloses nas condições de 52,50% de etanol e tempo de reação de 24 h. No entanto, os autores destacam que a concentração de etanol teve maior influência na remoção de lignina, enquanto o tempo de reação praticamente não influenciou o rendimento de deslignificação dentro do intervalo estudado (0–24 h).

O pré-tratamento ácido emprega compostos como ácido sulfúrico e ácido acético, entre outros, para a separação eficiente dos componentes da biomassa

(Mussatto, 2016). No estudo realizado por Selvakumar *et al.* (2022), esse método permitiu a extração seletiva dos três componentes principais do sabugo de milho, obtendo rendimentos elevados de suas frações lignocelulósicas.

Pré-tratamento Alcalino versus Auto-hidrólise

Entre os métodos já mencionados, destacam-se os pré-tratamentos de auto-hidrólise e o pré-tratamento alcalino, uma vez que estes são extensivamente discutidos na literatura e aplicados em diversos estudos mesmo diante da variedade de processos disponíveis para o pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, cuja escolha depende diretamente do objetivo pretendido, conforme já descrito. Nesse sentido, torna-se necessário avaliar qual método apresenta melhor adequação e vantagens em relação as aplicações planejadas.

O pré-tratamento auto-hidrólise, também chamado de hidrotérmico ou de *Liquid Hot Water* (LHW), consiste essencialmente na combinação da biomassa com água em condições determinadas de tempo, sob altas temperaturas para a despolimerização das hemiceluloses (Carvalho *et al.*, 2008). Esse método atua predominantemente nos polissacarídeos presentes nas hemiceluloses, promovendo sua solubilização em uma fração líquida. Esse processo facilita a quebra dessas cadeias em açúcares simples durante a etapa de hidrólise enzimática, aumentando a eficiência geral do processo para obtenção de açúcares para produção de etanol, por exemplo. Como resultado, observa-se melhora no rendimento de etanol produzido a partir da biomassa (Moniz *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2020).

O pré-tratamento alcalino, por sua vez, é realizado mediante a adição de uma solução alcalina à biomassa, geralmente utilizando hidróxido de sódio (NaOH). Essa concentração de solução alcalina varia conforme os parâmetros otimizados para atender às especificidades do processo, por exemplo, com objetivos de somente extrair frações de hemiceluloses ou também de lignina (Michalska; Ledakowicz, 2013; Muthuvelu *et al.*, 2019; Ruzene *et al.*, 2008).

Michalska e Ledakowicz (2013) relataram a obtenção de elevadas taxas de remoção de lignina, superiores a 99%, e uma degradação significativa de hemiceluloses, atingindo 87,52% de degradação de hemiceluloses, ao utilizar o pré-tratamento alcalino, sob as condições de 5% de massa de NaOH, 121°C

por 30 min, utilizando biomassa de sorgo. Após o pré-tratamento, o material resultante apresentou-se enriquecido em celulose, com presença residual de hemiceluloses. Para mitigar esse problema, podem ser aplicados ajustes nas condições do pré-tratamento ou em etapas complementares. No entanto, mesmo com esse resíduo, a polpa obtida ainda apresentou elevado potencial para processos que priorizam a conversão em celulose.

Embora os dois pré-tratamentos possuam fundamentos distintos, os resultados alcançados apresentaram potencial de aplicação, assim como vantagens e desvantagens que precisam ser levados em consideração. Estudos realizados por Carvalheiro *et al.* (2008) comprovaram que a estrutura da lignina resultante do pré-tratamento auto-hidrólise foi satisfatória, apresentando uniformidade e similaridade à sua composição original. Uma notória vantagem consiste no fato de que esse método obteve êxito mesmo em condições experimentais mais amenas (Díaz *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2016), o que quando combinado com a menor necessidade de reagentes onerosos e as condições de processamento e tempo de reação, aponta um elevado custo-benefício, resultando na diminuição das despesas operacionais (Rezania *et al.*, 2020; Schmidt; Wiege; Hollmann, 2021). Outro aspecto que reforça a viabilidade econômica do pré-tratamento auto-hidrólise é a possibilidade de aproveitamento integral direto das frações sólidas e líquidas geradas durante o processo. A fração sólida é composta por lignina e celulose, enquanto a fração líquida permite a recuperação de produtos de valor agregado, como xilooligossacarídeos (Carvalheiro *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2016).

Em relação ao pré-tratamento alcalino, outros aspectos o caracterizam, distinguindo-o da auto-hidrólise. Raina *et al.* (2024) compararam o desempenho dos pré-tratamentos auto-hidrólise, alcalino, peróxido alcalino e organosolv no bagaço de cana-de-açúcar. Nesse estudo, além da redução da quantidade de resíduos gerados, foi constatado um menor consumo de energia ao utilizar pré-tratamento com peróxido alcalino 5% (m/m), resultando em 0,619 kWh/kg, enquanto o pré-tratamento auto-hidrólise, utilizando autoclave por 30 min, consumiu 46,593 kWh/kg.

O maior interesse pelos subprodutos do pré-tratamento alcalino refere-se à sua fração celulósica, em especial para a indústria de papel, o que destaca a necessidade de direcionamento adequado para as demais frações obtidas

(Woiciechowski *et al.*, 2020). Apesar disso, o pré-tratamento alcalino é eficiente e garante deslignificação acompanhada de baixo nível de degradação de celulose, baixa interação com hemiceluloses e se destaca ao garantir acessibilidade à celulose (Kim; Lee; Kim, 2015; Michalska; Ledakowicz, 2013). Em contraste, Michalska e Ledakowicz (2013) observaram que reagentes alcalinos demonstraram um desempenho mais eficiente em biomassas herbáceas quando comparadas às biomassas lenhosas, sendo este método também caracterizado por tempos de reação mais longos (Kim; Lee; Kim, 2015; Raina *et al.*, 2024).

Embora diversos avanços já tenham sido alcançados, existem limitações nos métodos de pré-tratamento, sendo evidente que ainda há um vasto campo de investigação para aprimorar esses processos. Singh *et al.* (2018) propuseram uma estratégia inovadora para otimizar o pré-tratamento alcalino, utilizando um processo em dois estágios. Ao empregar etanol gelado em proporção 1:1 com a solução alcalina e realizar uma lavagem subsequente com água, foi possível reduzir o uso de reagentes, resultando em uma diminuição considerável dos custos operacionais. De forma semelhante, Carvalho *et al.* (2024) conseguiram reduzir o consumo de água em 11,25 L (representando 64% da quantidade convencionalmente utilizada) em cada ciclo de batelada, ao reutilizar a fração líquida da batelada anterior no processo de pré-tratamento auto-hidrólise. Adicionalmente, obtiveram um rendimento de 53% de glicose e uma remoção de 94% das hemiceluloses.

Esses exemplos demonstram que ao considerar a seleção de um método de pré-tratamento, seja por auto-hidrólise ou alcalino, ou até mesmo outros processos existentes, é essencial levar em consideração esses fatores, incluindo a composição da biomassa, as características de cada processo e os fatores determinantes para eficiência do processo.

DESAFIOS E PERSPECTIVAS

No cenário de otimização dos pré-tratamentos da biomassa lignocelulósica, percebeu-se que, embora a construção de uma rede de conhecimento sobre esse tema esteja em andamento, ainda há espaço para melhoria. Uma questão pontual, quando se pensa nas limitações do uso da biomassa para geração de

energia, ocorre ao avaliar uma larga escala produtiva, visto que isso implica maiores gastos energéticos e, como consequência, financeiros.

A viabilidade econômica e logística é um ponto chave para a expansão do uso da biomassa como matéria-prima, devido os combustíveis fósseis dominam o mercado, sendo extremamente difundido em todo o mundo. Apesar dos esforços, há muito a ser analisado, produzido e desenvolvido para que a biomassa alcance seu concorrente na corrida de transição energética, tornando os processos economicamente viáveis e sustentáveis, facilitando sua aplicação em diversas áreas.

Adicionalmente, um fator essencial a ser pesquisado é, de fato, a adequabilidade dos pré-tratamentos diante das diferentes demandas, levando em consideração a necessidade, a origem da biomassa e sua composição. Paralelamente, além de buscar inovação, apropriar-se de estratégias utilizando os conhecimentos e métodos já existentes para melhorar os resultados também é uma opção adequada, inclusive citada no presente trabalho. Por fim, espera-se uma positiva perspectiva do futuro, em que a biomassa consiga assumir seu papel como matéria-prima sustentável, evitando o esgotamento dos recursos naturais terrestres.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biomassa lignocelulósica apresenta um grande potencial para indústria global na transição dos combustíveis fósseis para fontes de matéria-prima sustentáveis. Para viabilizar essa transição, os pré-tratamentos assumem um papel importante como grandes facilitadores de processos de conversão da biomassa, principalmente em energia e biocombustíveis. Existe uma ampla variedade de pré-tratamentos, cada um com suas especificidades, o que se torna imprescindível a análise e caracterização de cada técnica.

Com relação aos pré-tratamentos discutidos nessa revisão, o alcalino apresenta como vantagens maior viabilidade energética, com possibilidade de recuperação dos reagentes utilizados. Por outro lado, suas desvantagens incluem os longos tempos de reação e menor eficiência em biomassa lenhosa. No entanto, estratégias de otimização podem ser investigadas, como por exemplo, combinar o pré-tratamento alcalino em um processo de dois estágios. Enquanto

o pré-tratamento auto-hidrólise, também denominado como hidrotérmico e LHW, apresentou como vantagens o menor custo com reagentes, tempo de reação mais curtos e condições operacionais mais amenas. Contudo, uma das principais desvantagens do método inclui as altas temperaturas empregadas no processo, que demandam maior consumo de energia.

Desse modo, foi possível alcançar uma maior compreensão acerca da aplicação desses pré-tratamentos na biomassa lignocelulósica, uma vez que o pré-tratamento alcalino é comumente utilizado para deslignificação e obtenção de hemiceluloses, o que implica na necessidade do uso de reagentes. Em contrapartida, o auto-hidrólise é mais direcionado à extração de hemiceluloses, sendo um processo que pode ser realizado com o uso exclusivo de água.

Agradecimentos

Os autores agradecem o auxílio financeiro das agências brasileiras de fomento à pesquisa, como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sob o Código de Financiamento 001 e vinculada ao Ministério da Educação (MEC), e a Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE). Nossos agradecimentos também à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT, Portugal) pelo apoio financeiro ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Agroalimentares e Sustentabilidade (CISAS) [UID/05937/2025 (doi.org/10.54499/UID/05937/2025)].

REFERÊNCIAS

ADNAN, M.; AHMED, A.; RAFIQ, M.; ULLAH, N.; AHMAD, A.; SARFRAZ, M.; ULLAH, R.; AHMAD, M.; YU, B.; CONG, H. Green approaches for modifying lignocellulosic features: Recent advances in reducing recalcitrance for sustainable bioethanol production. **Biomass and Bioenergy**, v. 203, p. 108304, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108304>.

- BENSALAH, H.; RAJI, M.; ABDELLAOUI, H.; ESSABIR, H.; BOUHFDI, R.; QAISS, A. E. K. Thermo-mechanical properties of low-cost "green" phenolic resin composites reinforced with surface modified coir fiber. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 112, p. 1917-1930, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06535-9>.
- CAPEK-MÉNARD, E. JOLLIEZ, P. CHONET, E. WAYMAN, M. DOAN, K. Pretreatment of waste paper for increased ethanol yields. **Biotechnology Letters**, v.14, p.985-988, 1992. <https://doi.org/10.1007/BF01020642>.
- CARVALHEIRO, F.; SILVA-FERNANDES, T.; DUARTE, L. C.; GÍRIO, F. M. Wheat Straw Autohydrolysis: Process Optimization and Products Characterization. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 153, n. 1, p. 84–93, 2009. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8448-0>.
- CARVALHO, F. B. P.; RODRIGUES, D. S.; MACHADO, F.; GAMBETTA, R. Autohydrolysis of Sugarcane Bagasse with Water Reuse: Impacts on Residues' Composition and Enzymatic Hydrolysis. **Sustainable chemistry for the environment**, v. 6, p. 100097, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100097>.
- CORATO, U.; BARI, I.; VIOLA, E.; PUGLIESE, M. Assessing the main opportunities of integrated biorefining from agro-bioenergy co/by-products and agroindustrial residues into high-value added products associated to some emerging markets: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 88, p. 326-346, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.041>.
- DEMIRBAS, A. The importance of bioethanol and biodiesel from biomass. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, v. 3, n. 2, p. 177-185, 2008. <https://doi.org/10.1080/15567240600815117>.
- DÍAZ, S.; ORTEGA, Z.; BENÍTEZ, A. N.; COSTA, D.; FLORBELA CARVALHEIRO; FERNANDES, M. C.; DUARTE, L. C. Assessment of the effect of autohydrolysis treatment in banana's pseudostem pulp. **Waste Management**, v. 119, p. 306–314, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.034>.
- HAYES, D. J. M. Biomass Composition and Its Relevance to Biorefining. *In*: TRIANTAFYLIDIS, K. S.; LAPPAS, A. A.; STÖCKER, M. (eds.). **The Role of Catalysis for the Sustainable Production of Bio-fuels and Bio-chemicals**. Elsevier, 2013. p. 27–65. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-56330-9.00002-4>.
- ILANIDIS, D.; STAGGE, S.; JÖNSSON, L. J.; MARTÍN, C. Hydrothermal Pretreatment of Wheat Straw: Effects of Temperature and Acidity on Byproduct Formation and Inhibition of Enzymatic Hydrolysis and Ethanol Fermentation. **Agronomy**, v. 11, n. 3, p. 487, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030487>.
- KIM, J. S.; LEE, Y. Y.; KIM, T. H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 199, p. 42–48, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>.
- LATIF, N. H. A.; BROSSE, N.; ZIEGLER-DEVIN, I.; CHRUSIEL, L.; HASHIM, R.; HUSSIN, M. H. A comparison of alkaline and organosolv lignin extraction methods from coconut husks as an alternative material for green applications. **BioResources**, v. 17, n. 1, p. 469–491, 2022. <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.469-491>.
- LU, H.; ZHANG, L.; YAN, M.; WANG, K.; JIANG, J. Screw extrusion pretreatment for high-yield lignocellulose nanofibrils (LCNF) production from wood biomass and non-wood biomass. **Carbohydrate Polymers**, v. 277, p. 118897, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118897>.
- MEGALA, S.; REKHA, B.; SARAVANATHAMIZHAN, R. Chemical and non-chemical pre-treatment techniques for bio ethanol production from biomass. **International Journal of Energy and Water Resources**, v. 4, n. 2, p. 199–204, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00064-7>.
- MICHALSKA, K.; LEDAKOWICZ, S. Alkali pre-treatment of Sorghum Moench for biogas production. **Chemical Papers**, v. 67, n. 9, p. 1130-1137, 2013. <https://doi.org/10.2478/s11696-012-0298-0>.

MONIZ, P.; LINO, J.; DUARTE, L. C.; ROSEIRO, L. B.; BOERIU, C. G.; PEREIRA, H.; CARVALHEIRO, F. Fractionation of Hemicelluloses and Lignin from Rice Straw by Combining Autohydrolysis and Optimised Mild Organosolv Delignification. **BioResources**, v. 10, n. 2, p.2626-2641, 2015. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.2626-2641>.

MUSSATTO, S. I. Biomass Pretreatment with Acids. *In*: MUSSATTO, S. I. (ed.). **Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery**. Elsevier, 2016. p. 169–185. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00008-6>.

MUTHUVELU, K. S.; RAJARATHINAM, R.; KANAGARAJ, L. P.; RANGANATHAN, R. V.; DHANASEKARAN, K.; MANICKAM, N. K. Evaluation and characterization of novel sources of sustainable lignocellulosic residues for bioethanol production using ultrasound-assisted alkaline pre-treatment. **Waste Management**, v. 87, p. 368–374, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.015>.

NITSOS, C. K.; MIHAILOF, C. M.; MATIS, K. A.; LAPPAS, A. A.; TRIANTAFYLIDIS, K. S. The Role of Catalytic Pretreatment in Biomass Valorization Toward Fuels and Chemicals. *In*: TRIANTAFYLIDIS, K. S.; LAPPAS, A. A.; STÖCKER, M. (eds.). **The Role of Catalysis for the Sustainable Production of Bio-fuels and Bio-chemicals**. Elsevier, 2013. p. 217–260. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56330-9.00007-3>.

RAINA, N.; BOONMEE, R.; KIRDPONPATTARA, S.; NARASINGHA, M.; SRIARIYANUN, M.; PHITSUWAN, P.; CHUETOR, S. Process performance evaluation of different chemical pretreatments of lignocellulosic biomass for bioethanol production. **Industrial Crops and Products**, v. 211, p. 118207, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118207>.

REZANIA, S.; ORYANI, B.; CHO, J.; TALAIEKHOZANI, A.; SABBAGH, F.; HASHEMI, B.; RUPANI, P. F.; MOHAMMADI, A. A. Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: An overview. **Energy**, v. 199, p. 117457, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117457>.

RUZENE, D. S.; GONÇALVES, A. R.; TEIXEIRA, J. A.; AMORIM, M. T. P. Carboxymethylcellulose Obtained by Ethanol/Water Organosolv Process Under Acid Conditions. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 137, n. 1, p. 573–582, 2007. <https://doi.org/10.1007/s12010-007-9080-0>.

RUZENE, D. S.; SILVA, D. P.; VICENTE, A. A.; GONÇALVES, A. R.; TEIXEIRA, J. A. An alternative application to the Portuguese agro-industrial residue: wheat straw. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 147, p. 85–96, 2008. <https://doi.org/10.1007/s12010-007-8066-2>.

SADHUKHAN, J.; MARTINEZ-HERNANDEZ, E.; AMEZCUA-ALLIERI, M. A.; ABURTO, J.; HONORATO-SALAZAR, J. A. Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlations to lignocellulosic composition. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, p. 100230, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100230>.

SANT'ANA JÚNIOR, D. B.; KELBERT, M.; ARAÚJO, P. H. H.; ANDRADE, C. J. Physical Pretreatments of Lignocellulosic Biomass for Fermentable Sugar Production. **Sustainable Chemistry**, v. 6, n. 2, p. 13, 2025. <https://doi.org/10.3390/suschem6020013>.

SARAVANAN, A.; YAASHIKAA, P. R.; KUMAR, P. S.; THAMARAI, P.; DEIVAYANAI, V. C.; RANGASAMY, G. A comprehensive review on techno-economic analysis of biomass valorization and conversational technologies of lignocellulosic residues. **Industrial Crops and Products**, v. 200, p. 116822, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116822>.

SCHMIDT, M.; WIEGE, B.; HOLLMANN, J. Comparison of Alkaline/Oxidative and Hydrothermal Extraction of Wheat Bran Arabinoxylans. **Foods**, v. 10, n. 4, p. 826, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10040826>.

SELVAKUMAR, P.; ADANE, A. A.; ZELELEM, T.; HUNEGNAW, B. M.; KARTHIK, V.; KAVITHA, S.; JAYAKUMAR, M.; KARMEGAM, N.; GOVARTHANAN, M.; KIM, W. Optimization of binary acids pretreatment of corncob biomass for enhanced recovery of cellulose to produce bioethanol. **Fuel**, v. 321, p. 124060, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124060>.

SHINNERS, K. J.; DIGMAN, M. F.; RUNGE, T. M. Biomass Logistics – Harvest and Storage. *In*: **Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Fibers from Forest Biomass**. Washington, DC: American Chemical Society, 2011, p. 65-86. <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1067.ch003>.

SINGH, R. D.; BANERJEE, J.; SASMAL, S.; MUIR, J.; ARORA, A. High xylan recovery using two stage alkali pre-treatment process from high lignin biomass and its valorisation to xylooligosaccharides of low degree of polymerisation. **Bioresource Technology**, v. 256, p. 110–117, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.009>.

VIEIRA, F.; SANTANA, H. E. P.; JESUS, M.; MATA, F.; PIRES, P.; VAZ-VELHO, M.; SILVA, D. P.; RUZENE, D. S. Comparative Study of Pretreatments on Coconut Fiber for Efficient Isolation of Lignocellulosic Fractions. **Sustainability**, v. 16, n. 11, p. 4784, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16114784>.

WANG, P.; FU, Y.; SHAO, Z.; ZHANG, F.; QIN, M. Structural Changes to Aspen Wood Lignin during Autohydrolysis Pretreatment. **BioResources**, v. 11, n. 2, p. 4086–4103, 2016. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.4086-4103>.

WOICIECHOWSKI, A. L.; DALMAS NETO, C. J.; VANDENBERGHE, L. P. S.; CARVALHO NETO, D. P.; SYDNEY, A. C. N.; LETTI, L. A. J.; KARP, S. G.; TORRES, L. A. Z.; SOCCOL, C. R. Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – Conventional processing and recent advances. **Bioresource Technology**, v. 304, p. 122848, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122848>.

YING, W.; CAI CHUNJING; JUNHUA, L.; XUAN, L.; ZHAOJIANG, W.; JIE, C. Efficient crop straws biotreatment using the fungus *Cerrera unicolor* GC.u01. **AMB express**, v. 14, n. 28, 2024. <https://doi.org/10.1186/s13568-024-01668-6>.

YOUSUF, A.; PIROZZI, D.; SANNINO, F. Fundamentals of lignocellulosic biomass. *In*: **Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels**. London: Academic Press, 2020. p. 1-15. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815936-1.00001-0>.

ZHANG, W.; ZHANG, X.; LEI, F.; JIANG, J. Co-production bioethanol and xylooligosaccharides from sugarcane bagasse via autohydrolysis pretreatment. **Renewable Energy**, v. 162, p. 2297–2305, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.034>.

ZHENG, Y.; SHI, J.; TU, M.; CHENG, Y. S. Principles and Development of Lignocellulosic Biomass Pretreatment for Biofuels. *In*: LI, Y.; GE, X. (eds.). **Advances in Bioenergy**. London: Elsevier, 2017. v. 2, p. 1-68. <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2017.03.001>.

ZHONG, L.; WANG, C.; XU, M.; JI, X.; YANG, G.; CHEN, J.; JANASWAMY, S.; LYU, G. Alkali-Catalyzed Organosolv Pretreatment of Lignocellulose Enhances Enzymatic Hydrolysis and Results in Highly Antioxidative Lignin. **Energy & Fuels**, v. 35, n. 6, p. 5039–5048, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00320>.

GESTÃO DOS RCC EM CANTEIROS DE OBRAS E PLANOS DE GERENCIAMENTO DE RCC EM CANTEIROS DE OBRAS

Luiz Paulo Vieira de Vieira de Araújo Júnior

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Caio Dantas Gregolis

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

RESUMO

Objetivo: Diariamente quantidades significativamente relevantes de resíduos são produzidas em consequência das atividades humanas. Com o crescimento da indústria da Construção Civil, a geração de resíduos provenientes deste setor passou a consistir em um importante problema a ser sanado. Portanto, faz-se de extrema necessidade o gerenciamento adequado dos resíduos, de modo que estes resíduos sejam tratados de maneira eficaz e eficiente para que se tenha a redução dos impactos ambientais negativos. O objetivo deste trabalho é apresentar os principais conceitos e mostrar um panorama sobre a gestão dos resíduos de construção em canteiro de obra e planos de gerenciamento de resíduos de construção em canteiros de obra. **Métodos:** A metodologia utilizada para realizar é através de uma revisão da literatura sobre a temática. **Resultados:** Este trabalho apresentou uma visão geral sobre os principais tópicos referente à temática gestão dos resíduos de construção em canteiro de obra e planos de gerenciamento de resíduos de construção em canteiros de obra. **Conclusão:** Este trabalho pode ser importante para academia e para os especialistas da área.

Palavras-chave: Resíduos de construção civil; planos de resíduos; sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A humanidade, através dos séculos, vem conquistando espaços quase sempre em detrimento de uma contínua falta de preservação dos recursos naturais (Sansão, 2009).

Segundo Morais (2006), a degradação do meio ambiente é devido à acelerada urbanização, que resultou no rápido adensamento das cidades e, por conseguinte, o crescimento das atividades do setor da indústria da construção, sendo que a geração de resíduos do setor da construção civil alcançou índices alarmantes, produto do desperdício encontrado nas obras, nas construções, nas reformas e nas demolições.

A produção de quantidades significativas de resíduos de construção civil é um dos principais problemas enfrentados em áreas urbanas, segundo SENAI (2007). Estes resíduos não são corretamente gerenciados, existindo a falta de interesse em relação a uma adequada destinação, conforme Hoshino (2010), e a uma disposição final ambientalmente adequada dos mesmos (SENAI, 2007).

De acordo com levantamentos feitos em diversas cidades brasileiras, os resíduos de construção representam cerca de 60% de todos os resíduos sólidos urbanos, ou seja, este valor é muito superior ao do resíduo domiciliar (Gaede, 2008).

Morais (2006) enfatiza que, a preocupação com os resíduos no Brasil relativamente é recente. No que se refere especificamente aos da construção civil, entrou em vigor 05 de Fevereiro de 2002, a Resolução nº. 307, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), um instrumento legal que fixou prazos para as prefeituras municipais elaborarem e implantarem planos de gestão para este tipo de resíduo, além de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, definindo e deixando clara a responsabilidade do gerador sobre os seus resíduos.

No Brasil, ainda é incipiente a quantidade de empresas de construção civil que fazem a gestão de resíduos em canteiro de obra e desenvolvem ações planejadas para redução da geração de resíduos. A segregação, acondicionamento e disposição final qualificada dos resíduos ainda não são realizados de forma adequada e integrada às atividades produtivas do canteiro de obra.

Diante do exposto o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura sobre a temática: Gestão dos RCC em Canteiros de Obras e Planos de Gerenciamento de RCC em Canteiros de Obras, tendo por finalidade demonstrar um panorama da gestão dos resíduos de acordo com as normas vigentes e algumas características dos planos de gerenciamento de resíduos sólidos em canteiros de obras.

Justificativa

A indústria da construção civil é um grande gerador de resíduos, por isso, existe a necessidade de se discutir melhores maneiras de realizar um melhor gerenciamento dos resíduos, em especial, os resíduos de construção civil, para que, no futuro, não ocorram mais problemas no ambiente, fazendo com que se tenha uma otimização dos processos dentro do canteiro de obras e também uma melhor modulação dos projetos.

Como citado por Kunkel (2009), como a urbanização vem crescendo, há uma migração da indústria de agregados, que fornece matéria prima em sua maioria de materiais pétreos, para distante dos centros urbanos, ocasionando um aumento de custos com transporte e armazenamento pelas construtoras. Assim sendo, o reaproveitamento e a reciclagem dos resíduos da construção civil vêm a reduzir esse custo, pois, o mesmo pode ser reutilizado onde é gerado, fazendo com que diminua os impactos ambientais negativos, prolongando a vida e garantindo a sustentabilidade dos recursos naturais.

O desenvolvimento sustentável deve representar mudanças na maneira como são explorados os recursos naturais, e a utilização de inovações tecnológicas para o melhor aproveitamento dos resíduos gerados deve atender de maneira satisfatória as aspirações e demandas da população no presente e no futuro (Sansão, 2009).

Como citado por Tozzi (2006), a implantação de práticas de gerenciamento de resíduos nos canteiros de obras é de fundamental importância para o setor da construção civil.

Deste modo, este estudo se justifica para se entender como são gerenciando os resíduos gerados no canteiro de obras e os planos de gerenciamento dos resíduos, pois há a necessidade de se entender as alguns dos princípios

conceitos e deficiências sobre a área, observando se estão de acordo com as normas vigentes, procurando, assim, a preservação ambiental.

MÉTODOS

A pesquisa se caracteriza como descritiva, bibliográfica, e qualitativa, sob uma abordagem metodológica sistêmica, de caráter exploratório, pois busca analisar as causas e efeitos dos fenômenos que contribuem para análise da importância do tema.

A revisão bibliográfica será desenvolvida com o intuito de analisar os principais conceitos e abordagens da leitura, bem como eleger os alguns dos autores que norteiam a pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise bibliográfica

Foram abordados os seguintes tópicos referentes aos resíduos em canteiros de obras nesta seção deste trabalho: definição e classificação dos resíduos; a geração dos resíduos da construção civil; o gerenciamento de resíduos da construção civil no canteiro de obras; a regulamentação ambiental pertinente a estes resíduos; o gerenciamento e os planos necessários para a gestão dos resíduos sólidos; como também sobre as responsabilidades dos geradores.

Definição e classificação dos resíduos

Segundo a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, deve-se considerar como rejeitos os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade, senão a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010b). Já com relação a outras definições, de acordo com a legislação, o termo “lixo” não deve mais ser empregado.

Com relação à definição do que é resíduo, existem várias definições. Para Marques Neto (2005), resíduo significa aquilo que sobra de qualquer substância,

ou material, e que ganhou o acréscimo do adjetivo sólido, a fim de diferenciar os resíduos sólidos dos resíduos líquidos.

Segundo a Lei nº 12.305, resíduo é um material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semi-sólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010b).

De acordo com que consta na NBR 10.004 (ABNT, 2004a), resíduos sólidos são: resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004a, p. 01).

Como composição, segundo Obladem *et al.* (2009) os resíduos sólidos são constituídos por diversos materiais e diversas substâncias, adotando uma classificação dividida em três tipos de fração, que são: a orgânica, a reciclável e a fração de rejeito. A fração orgânica são os restos de alimentos e vegetais; a fração reciclável são os resíduos que apresentam a possibilidade de se tornarem matéria prima para a fabricação de materiais novos; já fração dos rejeitos são materiais que não têm mais nenhuma utilidade e que não podem ser reaproveitados, devido as suas características ou à inexistência de tecnologia para tal finalidade.

A caracterização dos resíduos da construção civil é particularmente importante no sentido de se identificar e quantificar os resíduos e, desta forma, planejar qualitativa e quantitativamente a redução, a reutilização, a reciclagem, contribuindo assim para a sua destinação final e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Lima e Lima, 2009).

Os resíduos provenientes da construção civil, conforme o SINDUSCON - MG (2008), são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e

demolições de obras de construção civil, bem como os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros plásticos, tubulações, fiação elétrica e outros, comumente denominados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Quanto à origem dos resíduos, eles são provenientes de obras da construção civil. Ademais, são muito heterogêneos, mas além de serem “sólidos e inertes”, eles devem estar no grupo dos resíduos “secos” – quanto à característica física – e no grupo dos resíduos “inorgânicos” – quanto à composição química (Kunkel, 2009, p.26).

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes, características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias, cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (ABNT NBR 10.004, 2004a).

De acordo com a Resolução do CONAMA nº 307, os resíduos da construção civil são classificados do seguinte modo (BRASIL, 2002): Classe A, Classe B, Classe C e Classe D. Os resíduos de construção civil da Classe “A” são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, sendo alguns deles a areia, o bloco de concreto celular, o bloco de concreto comum e o concreto armado, dentre outros. Os resíduos de Classe “B” são os resíduos recicláveis para outras destinações, como por exemplo: o aço de construção, o alumínio, o arame e o asfalto a quente, dentre outros resíduos. Os resíduos de Classe “C” são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação, tais como: o gesso, a manta asfáltica e a manta de lã de vidro, dentre outros. Já os resíduos de Classe “D” são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, como por exemplos: o amianto, o solvente, a lataria e as peças em fibro-cimento, dentre outros exemplos desta classe.

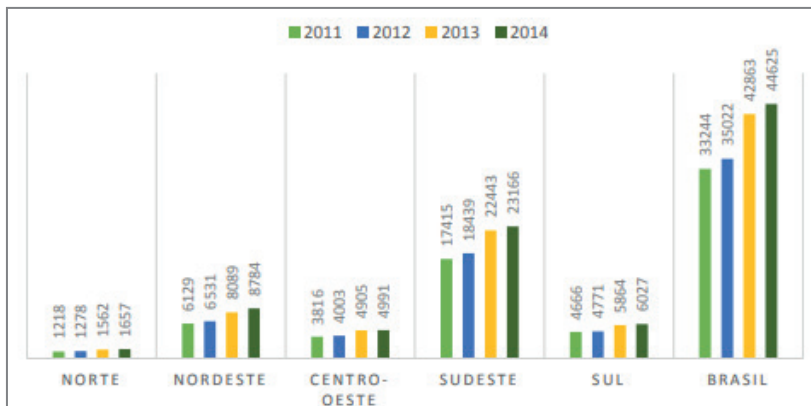
Geração dos resíduos da construção civil

Conforme Novaes e Mourão (2008), a geração de resíduo da construção civil é em torno de 450 kg/habitante/ano. Ademais, segundo os autores, os

resíduos da construção civil podem corresponder à aproximadamente 60% da massa de todos os resíduos gerados.

A geração dos resíduos da construção civil, nas cidades, vem crescendo significativamente, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Total de resíduos da construção e demolição no Brasil e Regiões (t x 1000/ano).

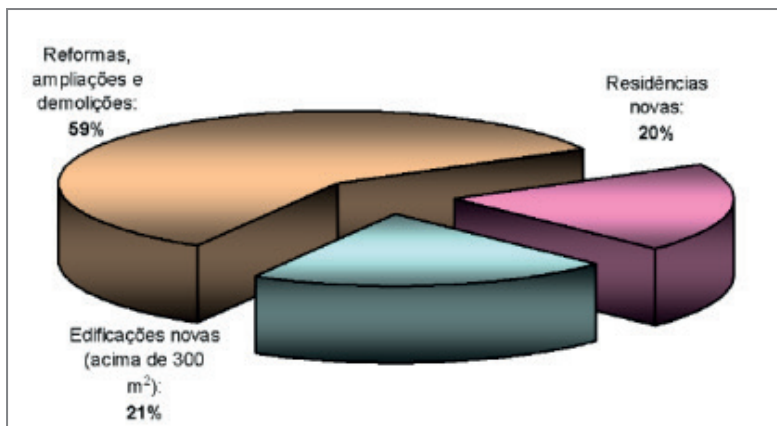


Fonte: ABRELPE (2014).

Pela Figura 1, percebe-se que a região sudeste é a que mais gera resíduos, seguida, respectivamente, pelas regiões nordeste, sul, centro oeste e norte, sendo que foi coletado pelos municípios brasileiros, no ano de 2014, aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição.

Segundo a ABRELPE (2014), os resíduos de construção e demolição coletados pelos municípios tiveram um aumento de 4,1% em relação a 2013, não refletindo o total dos resíduos gerados, pois estes são somente os que foram lançados nos logradouros públicos. Nota-se, conforme Figura 2, como é a constituição das origens dos resíduos na construção civil em pesquisas relacionadas em algumas cidades brasileiras.

Figura 2 - Origem dos resíduos de construção e demolição em algumas cidades brasileiras (% da massa total).



Fonte: MMA (2010).

Como exemplificado na Figura 2, observa-se que a grande maioria (59%) dos resíduos que são gerados na construção civil é proveniente de reformas, ampliações e demolições. Entretanto, não se pode dizer de onde vem o maior percentual, se é de reformas, ampliações ou demolições. As edificações representam novas 29% e as residências representam 20% dos resíduos em canteiro de obras.

De acordo com Bernardes *et al.* (2008), os resíduos oriundos da construção civil são considerados um problema, em razão das inúmeras consequências que podem acarretar para a saúde humana e para o meio ambiente. Nesse sentido, Benvenuto e Suzuki (2009) afirmam que, muitas vezes, não são tomados os devidos cuidados com esses resíduos e que as várias ações adotadas apenas sinalizam para a proibição de seu descarte, ou que, em alguns casos, os resíduos são transferidos das áreas de descarte irregular, para outras áreas que não são consideradas ambientalmente adequadas. A seguir, são alguns exemplos de disposição irregular, Figura 3.

Figura 3 - Exemplos de disposição irregular.

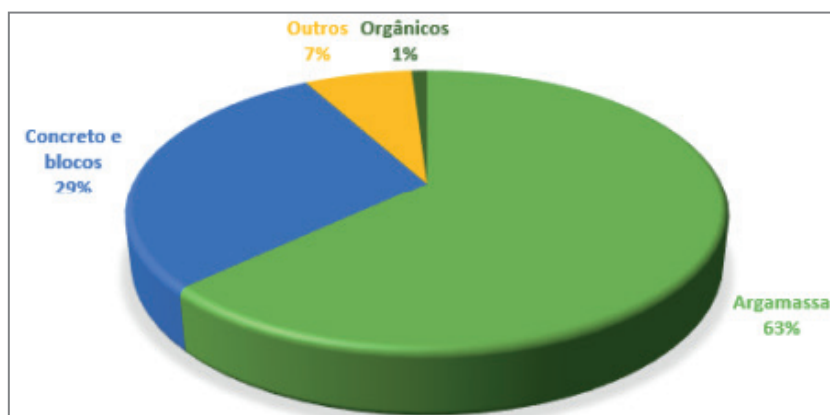


Fonte: Roth (2008).

A composição desse tipo de resíduo é considerada heterogênea. Por exemplo, Carneiro. (2001) citam que, no município de Salvador, o entulho apresenta 94% de materiais com alto potencial para a reciclagem na construção civil, constituindo, assim, uma jazida de matérias-primas passíveis de serem aproveitadas.

Na Figura 4 está sendo mostrada a composição média do entulho de obras no Brasil, sendo que a maior parte é composta pela argamassa, com 63%, seguida por concreto e blocos, com 29%.

Figura 4 - A composição média do entulho de obras no Brasil.



Fonte: Monteiro (2001).

A argamassa, junto com o concreto e blocos, correspondem a 92% dos resíduos, nos quais, conforme Carneiro (2001), passando por um processo de

britagem, podem produzir agregados graúdos com alto potencial de utilização na construção civil.

Já nos 7%, apresentado no gráfico representado na Figura 4, estão incluídos materiais como a madeira, o plástico, o papelão, os vidros e a cerâmica.

Diante do exposto, pode-se afirmar que existe uma diversidade na composição dos resíduos, nas diversas localidades, decorrentes da tradição construtiva e do local da coleta das amostras, o que evidencia que a maioria dos resíduos gerados é formada por parcelas recicláveis.

O gerenciamento de resíduos da construção civil no canteiro de obras

De acordo com Novaes e Mourão (2008), a maioria dos municípios não tem um plano integrado da gestão de resíduos operantes, nem adotam ações adequadas para sua destinação e disposição final ambientalmente adequada.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), quando se trata de gerenciamento de resíduos da construção civil, deve-se abordar um sistema de gestão que objetive a redução, a reutilização ou a reciclagem de resíduos, incluindo as responsabilidades, o planejamento, as práticas, os procedimentos e os recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos.

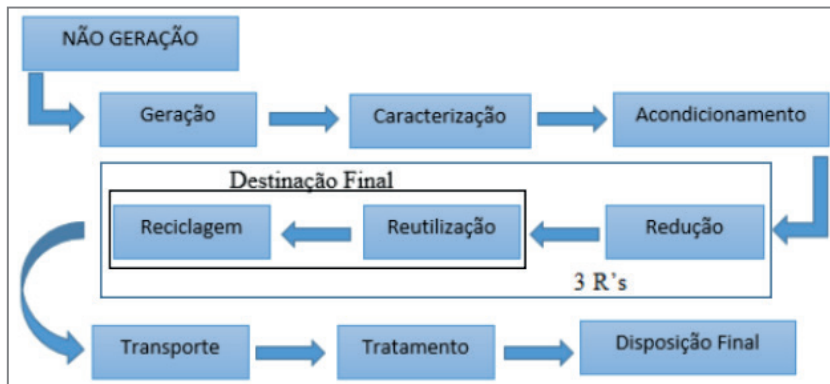
Como cita Novaes e Mourão (2008), a gestão nos canteiros contribui muito para a não geração de resíduos, podendo ter os seguintes benefícios: o canteiro fica mais organizado e mais limpo; haverá a triagem de resíduos, impedindo sua mistura; haverá possibilidade de reaproveitamento de resíduos antes de eles serem descartados; e serão quantificados e qualificados os resíduos descartados, possibilitando a identificação de possíveis focos de desperdícios de materiais.

A organização do canteiro e os dispositivos indicados têm a finalidade de viabilizar a coleta diferenciada e a limpeza de obra. Quanto ao fluxo dos resíduos no interior do canteiro, são mencionadas em legislações e resoluções recomendações para o acondicionamento inicial, o transporte interno dos resíduos e o seu acondicionamento final (Hoshino, 2010).

No canteiro de obras é que se inicia a separação dos resíduos, sendo que eles devem ter um acondicionamento inicial compatível com seu volume e preservando uma boa organização dos espaços nos diversos setores da obra.

Neste sentido, na Figura 5 determina-se a sequência de como tem que ser realizado o gerenciamento dos resíduos.

Figura 5 - Esquema de projeto de gerenciamento.

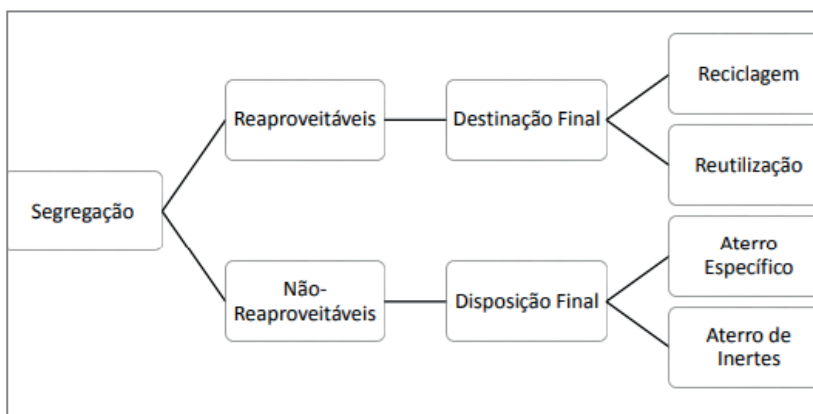


Fonte: Silva (2015).

Pelo exposto na Figura 5, a gestão dos resíduos deve visar o compromisso ambiental, sendo que o melhor seria que não houvesse a geração dos resíduos, mas pelos métodos de construção utilizados no Brasil até hoje, torna-se muito difícil a não geração, sendo assim, busca-se a minimização na geração de resíduos, aplicando-se o conceito dos 3Rs (reduzir, reutilizar e reciclar).

Após a minimização na geração de resíduos, deve-se segregar, separando-os como indicado na Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), conforme suas classes. Nesta etapa (Figura 6) têm-se os resíduos reaproveitáveis – na qual deve-se dar a destinação final ambientalmente adequada por meio da reutilização ou reciclagem – e os não reaproveitáveis – que precisam ser encaminhados para a disposição final ambientalmente adequada, que pode ser em aterro específico ou em aterro de inertes, dependendo do tipo de rejeito.

Figura 6 - Segregação de resíduos sólidos da construção civil.



Fonte: Silva (2015).

De maneira geral, para que os objetivos da gestão de resíduos sejam alcançados, é necessária a aplicação de técnicas de reutilização no canteiro de obras. Entre os diversos materiais utilizados nas obras de construção civil, passíveis de reutilização, a madeira se destaca por apresentar um grande potencial de reaproveitamento (Tozzi, 2006).

Como mencionado por Novaes e Mourão (2008), o reuso é uma grande contribuição para algum item que ia ser descartado, no qual ainda pode ser reutilizado, fazendo com que haja um aumento no aproveitamento de resíduos.

Já na reciclagem, os resíduos passam por procedimentos de mudança, servindo de matéria-prima para a produção de um novo produto que será utilizado no canteiro com outra destinação (Novaes e Mourao, 2008). Ou seja, é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido a uma transformação.

Conforme Hoshino (2010), o acondicionamento inicial será o mais próximo possível dos locais onde estão sendo gerados os resíduos, assim sendo, preservando a boa organização dos espaços dentro do canteiro de obras.

A seguir (Figura 7), é demonstrado modos de separação dos resíduos dentro da obra, fazendo com que este material possa ter um destino ambientalmente correto e também mantendo o ambiente dentro do canteiro de obras organizado e mais seguro.

Figura 7 - Depósito temporário de resíduos no canteiro de obra.



Fonte: Blumenschein (2007)

No que se refere a identificação de coletores e transportadores, a resolução CONAMA 275 (BRASIL, 2001) apresenta um padrão de cores para cada tipo de resíduo, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Código de cores para recipientes de resíduos sólidos..

Tipos de resíduos	Cor do recipiente
Papel e Papelão	Azul
Plástico	Vermelho
Vidro	Verde
Metals	Amarelo
Madeira	Preto
Resíduos Perigosos	Laranja
Resíduos ambulatoriais e de serviço de saúde	Branco
Resíduos radioativos	Roxo
Resíduos orgânicos	Marrom
Resíduo em geral, não reciclável ou misturado, ou contaminado, não passível de separação	Cinza

Fonte: Resolução CONAMA nº 275 (BRASIL, 2001).

Cabe observar que o transbordo deve ser feito em áreas devidamente legalizadas, conforme preconiza a NBR 15112 (ABNT, 2004). Nesse sentido, observa-se que na destinação final deve-se, em primeiro lugar, tentar reutilizar os materiais que estão aptos para isso. Entretanto, caso o resíduo não puder ser reutilizado, deve-se encaminhá-lo para a reciclagem.

A regulamentação ambiental pertinente para a gestão dos resíduos sólidos

Atualmente há no Brasil um conjunto de leis e políticas públicas, além de normas técnicas e cartilhas, que são fundamentais para gestão adequada dos resíduos provenientes do setor da construção civil, contribuindo para minimizar os impactos ambientais (MORAIS, 2006).

Destaca-se, nesse sentido, um resumo das principais regulamentações ambientais, principalmente a Legislação Federal e as normativas da Associação Brasileira de Normas Técnica.

Quanto a Legislação Federal pode-se destacar as seguintes:

- LEI FEDERAL 6938, DE 31 DE AGOSTO DE 1981 – dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências.
- LEI FEDERAL 12.305, DE 3 DE AGOSTO DE 2010 – Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e altera a Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
- RESOLUÇÃO CONAMA 275/2001 – estabelece código de cores para diferentes tipos de resíduos, a ser adotado na identificação de coletores e transportadores, bem como nas campanhas informativas para a coleta seletiva (BRASIL, 2001).
- RESOLUÇÃO CONAMA 307/2002 – estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos sólidos da construção civil (BRASIL, 2002).
- RESOLUÇÃO CONAMA 348/ 2004 – altera a Resolução Conama 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos (BRASIL, 2004).

Pelo exposto, é possível dizer que existem diversos dispositivos legais que tratam de questões específicas dos resíduos da construção civil. Entretanto, as diretrizes, os critérios e os procedimentos relativos à gestão integrada e ao gerenciamento destes resíduos, às responsabilidades dos geradores e do poder público são abordadas na Lei nº 12.305 e na Resolução CONAMA nº 307.

As responsabilidades dos geradores

Conforme a Lei 12.305/2010, é instituída a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. Como exemplificado na Lei 12.305/2010 todos os envolvidos no processo desde a produção até a disposição final são responsáveis pela geração dos resíduos.

A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos tem por objetivo (BRASIL, 2010b): compatibilizar interesses entre os agentes econômicos e sociais e os processos de gestão empresarial e mercadológica com os de gestão ambiental, desenvolvendo estratégias sustentáveis; promover o aproveitamento de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas; reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais; incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade; estimular o desenvolvimento de mercado, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis; propiciar que as atividades produtivas alcancem eficiência e sustentabilidade; incentivar as boas práticas de responsabilidade socioambiental.

Plano de geração de reeração de resíduos de construção civil

A construção de um plano de gerenciamento de resíduos traz a oportunidade de trabalhar os resíduos gerados de maneira correta, na medida em que projeta benefícios para os empresários no que diz respeito a questão financeira apontada pelo desperdício de material, dando a oportunidade de inserir no meio empresarial a discussão a respeito de sua responsabilidade no tocante às questões ambientais.

O Plano de Gerenciamento de Resíduos é uma metodologia de gerenciamento de resíduos baseado em planejamento, procedimentos e recursos que visam a redução e a minimização da geração de resíduos bem como ações adequadas e coerentes relativas a segregação, acondicionamento, coleta,

tratamento e destinação dos resíduos. Como aspectos positivos, destacam-se a redução dos impactos ambientais negativos, a preservação do meio ambiente, o incentivo a práticas sustentáveis e a segurança e qualidade de vida da população.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010), a elaboração e a implementação do PGRCC são obrigatórias às empresas de construção civil. A Resolução CONAMA nº 307/2002 e alterações determina a obrigatoriedade do PGRCC para os grandes geradores, assim definidos conforme a legislação específica.

O PGRCC deve ser apresentado juntamente com o projeto do empreendimento para a análise pelo poder público municipal, como condição para aprovação dos projetos e emissão do alvará de construção, segundo regulamentação específica do município. Também poderá ser exigido no âmbito do licenciamento ambiental junto aos órgãos competentes.

O PGRCC deve ser implantado na fase de concepção do empreendimento, tendo interface entre os projetos e os processos construtivos. O processo de implantação contempla o desenvolvimento de um conjunto de atividades realizadas dentro e fora dos canteiros de obras, suas etapas são: Planejamento, Treinamento, Implantação e Monitoramento.

A gestão responsável dos resíduos gerados em canteiros de obras requer uma compreensão das complexidades do processo de construção e as dificuldades em combinar as formas de destinação dos resíduos (BLUMENSCHNEIN, 2007) e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010b).

CONCLUSÃO

No contexto do que foi exposto, é possível perceber que a enorme geração de resíduos nos canteiros de obras e sua destinação inadequada são as principais causas que contribuem para o desperdício e os impactos negativos refletidos no meio ambiente. É de extrema importância que as empresas reavaliem seus processos construtivos e gerenciais em relação aos Resíduos da Construção Civil.

Destaca-se que é de extrema importância planejar a organização do canteiro, fornecer treinamento para a mão de obra, averiguar as ações desenvolvidas

no PGRCC através de um plano de monitoramento e analisar os projetos do empreendimento com intuito de reduzir ao máximo a geração de resíduos.

Outras que se tornariam interessantes para ter mais controle ou até é a diminuição sobre a geração de resíduos é através da racionalização dos processos construtivos nacionais, tornando-os mais inovadores. Outra solução poderia ser o uso de tecnologias que pudesse realizar modificações e realizar antes mesmo da construção ser efetivamente iniciada, que poderia ser a tecnologia BIM.

Portanto, verificou-se que os resíduos, infelizmente, continuam sendo um problema para órgãos gestores resolverem, carecendo de mais discussão e reflexão sobre o tema.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.112: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - áreas de transbordo e triagem - diretrizes para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 2004c.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014**. <http://abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>. Acesso em: Dezembro de 2021.

BENVENUTO, C.; SUZUKI, F. K. S. **Plano integrado de gerenciamento regional de resíduos de construção civil e volumosos**. Revista Limpeza Pública, n.71, 2009.

BERNARDES, A.; *et al.* **Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS**. *In: Ambiente construído*, Porto Alegre, v. 8, 2008.

BLUMENSCHNEIN, Raquel Naves. **Manual técnico: gestão de resíduos sólidos em canteiros de obras**. Brasília: SEBRAE/DF.2007.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2010b.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2010b.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 1981.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 275, de 25 de abril de 2001. **Estabelece o código de cores para diferentes tipos de resíduos na coleta seletiva**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2001.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 275, de 25 de abril de 2001. **Estabelece o código de cores para diferentes tipos de resíduos na coleta seletiva.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2001.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 307, de 05 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2002.

BRASIL. Resolução CONAMA nº. 348, de 16 de agosto de 2004. **Altera a Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2004.

CARNEIRO, V. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom.** Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001.

GAEDE, L. P. F. **Gestão dos resíduos da construção civil no município de Vitória-ES e normas existentes.** Belo Horizonte, 2008.

HOSHINO, Malio A. *et al.* **Estimativa e Indicadores dos Resíduos Sólidos da Construção Civil para Implantação da Gestão Ambiental,** 2010. Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2010.

KUNKEL, NEIDE. **Resíduos da construção civil aliado a produção mais limpa (P+L).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

LIMA, R. S.; LIMA, R. R. R. **Guia para Elaboração de Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.** CREA-PR, Paraná, 2009.

MARQUES NETO, J. C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil.** São Carlos: Rima, 2005.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Manual para implantação de sistema de gestão de resíduos de construção civil em consórcios públicos,** Brasília, 2010.

MONTEIRO, J.H.P. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia: subsídios para uma gestão sustentável.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2006.

NOVAES, M.V. e MOURÃO, C.A.M.A. **COOPERCON-CE – Cooperativa da Construção Civil do Estado do Ceará. Manual de Gestão Ambiental de Resíduos Sólidos na Construção Civil,** 1ª Ed., Marcos de Vasconcelos Novaes e Carlos Alexandre Martiniano do Amaral Mourão, 2008: Fortaleza, CE.

OBLADEM, N. L.; OBLADEM, N. T. R.; BARROS, K. R. **Guia para elaboração de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos.** Curitiba: CREA- PR, 2009.

ROTH, C. G. **Resíduos sólidos da construção de edificações: a solução pela gestão urbana.** 2008. 126 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Urbana) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2008.

SANSÃO, J. H. **Gerenciamento de resíduos de construção civil e demolição na cidade de Juiz de Fora-MG.** Belo Horizonte, 2009.

SENAI; SEBRAE; GTZ. **Gestão de Resíduos na construção civil: redução, reutilização e reciclagem.** 2007. Disponível em: Acesso em: Dezembro de 2021.

SILVA, F. C. **Estudo sobre o gerenciamento de resíduos em empresas da construção civil.** Alegrete, 2015.

SINDUSCON- MG; SENAI- MG. **Gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil.** 3º ed. rev. Belo Horizonte: SINDUSCON- MG, 2008.

TOZZI, R. F. **Estudo da influência do gerenciamento na geração dos resíduos da construção civil (RCC): estudo de caso de duas obras em Curitiba/PR.** 2006. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2006.

ADSORPTIVE REMOVAL OF ATRAZINE FROM AQUEOUS SOLUTION USING BIOCHAR DERIVED FROM *EUCALYPTUS SPP.* SAWDUST

Kevin Felipe Ramos

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

ABSTRACT

Objective: This study aimed to evaluate the adsorptive performance of biochar produced from *Eucalyptus spp.* sawdust for the removal of atrazine from aqueous solutions. **Methods:** The biochar was produced by pyrolysis at 600 °C under a nitrogen (N₂) atmosphere and characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and zeta potential analysis. Batch adsorption experiments were conducted to investigate the effects of adsorbent dosage, pH, contact time, initial concentration, and temperature. In addition, adsorption kinetics, equilibrium isotherms, thermodynamic behavior, and the reusability of the material through successive regeneration cycles were evaluated. **Results:** The biochar exhibited superior adsorptive performance compared with the raw biomass, achieving removal efficiencies above 80%. Adsorption equilibrium was reached within approximately 30 min, and the experimental data showed good agreement with the applied kinetic and isotherm models. The adsorption process was favored under acidic conditions and at 25 °C. Reusability tests demonstrated that the adsorbent maintained high removal efficiency for up to three consecutive cycles. **Conclusion:** These findings indicate that biochar derived from *Eucalyptus spp.* sawdust represents a promising and sustainable adsorbent for atrazine removal from contaminated aqueous systems.

Keywords: Adsorption; water; pollutants.

INTRODUCTION

The growing contamination of water resources by synthetic organic compounds has become one of the major environmental challenges associated with the intensification of agricultural and industrial activities. The extensive use of pesticides, herbicides, and fertilizers has contributed to the continuous introduction of these compounds into aquatic ecosystems, resulting in the occurrence of emerging contaminants in both surface and groundwater (BERGAMASCO; VIEIRA; SILVA, 2023; MORIN-CRINI *et al.*, 2022).

These pollutants may reach water bodies through different pathways, including soil leaching, agricultural surface runoff, and the improper disposal of agricultural and industrial effluents. Consequently, the persistent presence of these compounds has been widely reported in different environmental matrices, raising significant concerns regarding ecotoxicological impacts and the potential risks to human health associated with long-term exposure to low concentrations of these contaminants (ROY *et al.*, 2022).

Herbicides belonging to the triazine class stand out due to their frequent detection in aquatic environments. Among these compounds, atrazine (2-chloro-4-ethylamino-6-isopropylamino-1,3,5-triazine), a herbicide widely used worldwide for weed control in crops such as corn, sorghum, and sugarcane, exhibits moderate water solubility (33 mg L⁻¹ at 25 °C), low vapor pressure, and high chemical stability. These characteristics facilitate its environmental transport and hinder its natural degradation (AHMAD *et al.*, 2022; HONG *et al.*, 2022). In addition, toxicological studies have shown that prolonged exposure to atrazine may cause several adverse effects in living organisms, including endocrine disruption, alterations in the reproductive system, and neurotoxic effects, reinforcing the need for the development of efficient technologies for its removal in water treatment systems (ZHAO *et al.*, 2024).

Several technologies have been investigated for the removal of organic contaminants from aquatic environments, such as advanced oxidation processes, heterogeneous photocatalysis, bioremediation, and membrane separation processes (HASSAAN; ELDEEB; EL NEMR, 2022). Although these technologies can exhibit high efficiency under specific operational conditions, they often involve high operational costs, elevated energy consumption, the need for specific

operating conditions, or the formation of potentially toxic by-products during the degradation process. In this context, adsorption has been widely applied in tertiary effluent treatment due to its operational simplicity, application flexibility, and the possibility of using low-cost adsorbent materials, as well as its high removal efficiency (DUMITRIU; TEODOSIU, 2022; DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2024).

In this regard, activated carbon has been extensively used as an adsorbent in water treatment processes due to its high specific surface area, highly porous structure, and strong affinity for organic compounds. However, the high costs associated with the production and regeneration of this material have encouraged the search for alternative adsorbent materials that are both sustainable and economically viable. In this context, biochar, a carbonaceous material obtained through the pyrolysis of lignocellulosic biomass, has emerged as a promising adsorbent for environmental applications (AHMAD *et al.*, 2022).

Biochar can be produced from a wide variety of agro-industrial residues, such as corn straw, rice husk, sugarcane bagasse, and sawdust, representing a sustainable strategy for the valorization of residual biomass. These materials exhibit properties favorable for the adsorption of organic contaminants, including high porosity, significant surface area, and the presence of surface functional groups capable of interacting with organic molecules in aqueous solution through different physicochemical mechanisms (WANG *et al.*, 2025; HERNANDES *et al.*, 2022).

Additionally, structural modification strategies have been explored to enhance the adsorptive performance of biochar, such as physical or chemical activation processes, which can promote significant changes in the porous and surface structure of these materials. These modifications may result in an increase in specific surface area, micropore volume, and the density of active sites available for adsorption (YU *et al.*, 2022; JOSHI; BHATT; SRIVASTAVA, 2023).

In this context, it becomes relevant to investigate new adsorbent materials derived from renewable biomass that can be applied in the treatment of water contaminated by pesticides. Therefore, the present study aims to produce biochars derived from lignocellulosic sawdust residues of the forest species *Eucalyptus* spp. as potential biosorbents for the removal of the herbicide atrazine from aqueous solution.

METHODS

Materials and reagents

Sawdust from the forest species *Eucalyptus* spp. was obtained from a wood-processing industry located in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. The chemical reagents used were the herbicide atrazine ($C_8H_{14}ClN_5$, MW 318.13 g mol⁻¹, Sigma-Aldrich), hydrochloric acid (HCl, MW 36.46 g mol⁻¹, Alphatec), and sodium hydroxide (NaOH, MW 39.99 g mol⁻¹, Neon Commercial Ltda.).

Biochar synthesis

Sawdust residues from the forest species *Eucalyptus* spp., obtained from a wood-processing industry, were initially dried in a forced-air circulation oven at 60 °C for 24 h. The dried material was then ground and sieved through a 100-mesh sieve. The resulting raw biomass fraction was designated as EC.

Subsequently, the material was subjected to a pyrolysis process under a nitrogen (N₂) atmosphere, using a heating rate of 10 °C min⁻¹ until reaching a final temperature of 600 °C. After the pyrolysis process, the obtained material was further dried at 60 °C for 24 h. The produced biochar was designated as ECB.

Physicochemical characterization of the material

The chemical and surface characterization of the materials was carried out using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) in a PerkinElmer Frontier spectrometer, with a spectral resolution of 1 cm⁻¹ and a scanning range from 200 to 4000 cm⁻¹, in order to identify the functional groups present in the materials.

Additionally, the surface charge properties of the adsorbent were evaluated by zeta potential (ZP) analysis using a Zetasizer Nano analyzer (Malvern, ZS90).

Adsorption experiments

The adsorption experiments were conducted in a batch system under thermostatic agitation (SP Labor Ltda) at 180 rpm and room temperature (25 °C). For each experiment, 10 mL of a synthetic solution containing atrazine (AT)

as the target analyte was used at its natural pH, with an initial concentration of 5 mg L⁻¹. All experiments were performed in triplicate.

In the experiments evaluating the influence of adsorbent mass, amounts of 0.5 g and 1.0 g were used. After the contact period, the samples were filtered and the final concentration was determined using a UV-Vis spectrophotometer (Shimadzu 2600i/2700i) at a wavelength of 222 nm, corresponding to the herbicide. Based on these results, the contaminant removal efficiency (**Equation 1**) and the adsorption capacity per unit mass of the material (Q_e , mg g⁻¹) (**Equation 2**) were calculated.

$$\%R = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \quad (\text{Equation 1})$$

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \cdot V}{W} \quad (\text{Equation 2})$$

Where: C_o is the initial concentration of the adsorbate in solution (mg L⁻¹); C_e is the equilibrium concentration of the adsorbate in solution (mg L⁻¹); q_e (mg g⁻¹) is the adsorption capacity; W is the dry mass of the adsorbent (mg); and V is the final volume of the adsorbate solution (mL).

In the adsorption kinetic study, solution samples were collected at time intervals of 10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, and 120 minutes in order to determine the equilibrium time of the process, which was subsequently adopted in the following experiments. Based on the experimental data obtained, the results were fitted to the nonlinear kinetic models of pseudo-first-order (PFO) (**Equation 3**) and pseudo-second-order (PSO) (**Equation 4**).

$$qt = qe (1 - e^{-kt}) \quad (\text{Equation 3})$$

$$qt = \frac{k \cdot qe^2 \cdot t}{1 + k \cdot qe \cdot t} \quad (\text{Equation 4})$$

The effect of pH was evaluated within a range from 2 to 10. The pH adjustment of the atrazine solutions was performed by the addition of HCl or NaOH solutions at a concentration of 0.1 mol L⁻¹.

For the investigation of adsorption isotherms, the initial concentrations of the analyte ranged from 5 to 10 mg L⁻¹. The determination of the final concentration of the solutions allowed the estimation of the adsorption capacity

of the contaminant by the materials. The experimental data were fitted to the Langmuir (**Equation 5**) and Freundlich (**Equation 6**) isotherm models using linear regression.

$$qe = \frac{qm \cdot K_L \cdot Ce}{1 + K_L \cdot Ce} \quad (\text{Equation 5})$$

$$qe = K_F \cdot C_e^{1/n} \quad (\text{Equation 6})$$

Where: q_m (mg g⁻¹) is the maximum adsorption capacity; C_e is the equilibrium concentration of the adsorbate in solution (mg L⁻¹); q_e (mg g⁻¹) is the adsorption capacity; K^L (L mg⁻¹) is the Langmuir constant; K^f (mg g⁻¹) is the Freundlich isotherm constant; and n represents the adsorption intensity. Adsorption is considered favorable when $1/n$ ranges between 0.1 and 0.5.

Thermodynamic studies were conducted by varying the system temperature at 25 °C, 35 °C, and 45 °C, using the concentration defined in the previous experiment, while maintaining agitation at 180 rpm in a thermostatic bath.

Adsorbent reusability assay

The evaluation of adsorbent reusability was carried out through successive cycles of regeneration and adsorption. Initially, the adsorbent material was regenerated in a muffle furnace at 300 °C for 2 h in order to promote the removal of atrazine, considering the boiling point of the analyte. Subsequently, the fraction of the material that exhibited the highest adsorption capacity was brought into contact with the solution containing the analyte for 240 min at 25 °C under constant agitation. Afterward, the residual concentration of atrazine was determined by UV-Vis spectroscopy at a wavelength of 222 nm. The procedure was repeated for five consecutive cycles, using the previously regenerated adsorbent in each step.

RESULTS

Analysis of material characterization

In order to determine the surface charge properties of the adsorbent, zeta potential (ZP) analysis was performed using a Zetasizer Nano analyzer (Malvern, ZS90). The results indicated values of -11.4 mV and $+6.2$ mV for the EC and ECB samples, respectively. Considering that an increase in pyrolysis temperature may favor the formation of basic functional groups on the adsorbent surface (ZHAO *et al.*, 2018), a tendency toward an increase in the pH at the point of zero charge (pH_{pzc}) of the material can consequently be observed.

This result is consistent with the main bands observed in the FT-IR spectra (**Table 1**), in which a reduction of the functional groups responsible for decreasing the surface charge was identified.

Table 1 - Functional groups identified for samples EC and ECB.

Identification of functional groups	Wavenumber (cm^{-1})	
	Samples	
	EC	ECB
OH	3444	3444
CH	2920	-
C=O	1650	-
C=C	1510	1510
CO	1052	-

Source: the author .

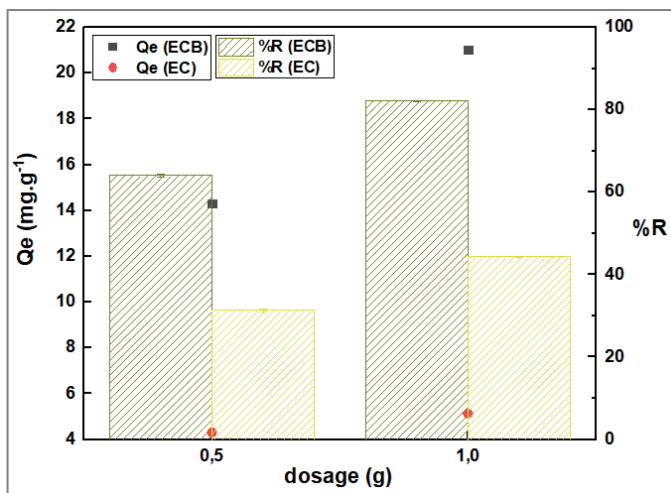
In summary, all samples exhibited a vibrational stretching band at 3444 cm^{-1} , corresponding to the O–H bond present in lignin and hemicellulose (MEILI *et al.*, 2019). However, in the ECB sample, the intensity of this band decreased significantly, indicating the occurrence of a cellulose dehydration reaction after the pyrolysis process (ZHOU *et al.*, 2018). In addition, the band at approximately 1510 cm^{-1} , associated with C=C stretching vibrations of aromatic structures in lignin, was observed in both the raw sample and the pyrolyzed material, indicating the presence of aromatic structures that remained or were formed during the thermal process.

In contrast, in the ECB sample, due to the applied thermal treatment, a reduction in the vibrational stretching bands at approximately 1650 cm^{-1} , 2920 cm^{-1} , and 1052 cm^{-1} was observed. These bands can be attributed, respectively, to C=O stretching vibrations or the deformation of adsorbed water in the cellulose structure, C-H vibrations, and C-O and C-O-C bonds characteristic of polysaccharides such as cellulose.

ANALYSIS OF ADSORPTION EXPERIMENTS

Figure 1 shows the effect of adsorbent mass (0.5 g and 1.0 g) on the adsorption capacity (Q_e) and removal percentage (%R) of atrazine by the materials. The adsorption process showed high efficiency, with removals of 82.1% and 44.3% when a mass of 1,0 g of ECB and EC samples was used, respectively.

Figure 1 - Atrazine removal efficiency as a function of adsorbent mass.



Source: the author.

Regarding the kinetic analysis of the adsorption process of the herbicide atrazine in aqueous medium, it was observed that equilibrium was reached at approximately 30 and 90 minutes for the ECB and EC samples, respectively. After these time intervals, the adsorption capacity remained constant. The kinetic parameters obtained from fitting the experimental data to the pseudo-first-order (PFO) and pseudo-second-order (PSO) models are presented in **Table 2**.

Table 2 - Kinetic model parameters for the adsorption of the analyte onto the samples.

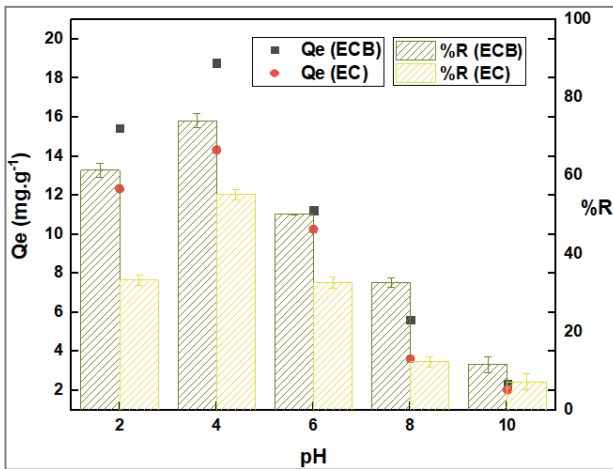
Samples	Kinetics models	Kinetic parameters		
		R ²	Q _e (mg.g ⁻¹)	k
ECB	PPO	0.9941	22.7591	0.264 ± 0.010
	PSO	0,9428	16.3422	0.217±0.016
EC	PPO	0,9863	4.4581	0.158 ± 0.014
	PSO	0,9357	3.6794	0.126 ± 0.012

Source: the author.

It was observed that, for both analyzed samples, the best fit of the experimental data was obtained using the pseudo-second-order (PSO) model, suggesting that the adsorption kinetic process occurred predominantly through chemisorption mechanisms.

Figure 2 shows the relationship between analyte adsorption and the variation in pH.

Figure 2 - Effect of pH on the adsorption of the herbicide atrazine.

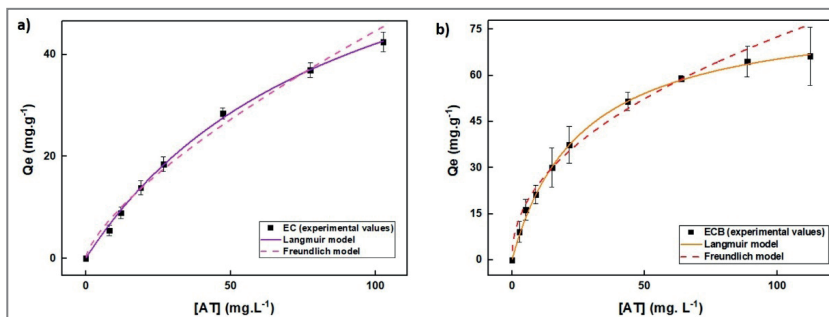


Source: the author.

It was observed that atrazine adsorption occurs under acidic conditions, specifically at pH 4, since as the pH increased, the adsorption capacity decreased significantly.

Regarding the analysis of the adsorption isotherm models of the analyte for the ECB and EC samples, **Figure 3** shows the experimental fits obtained from the application of the *Langmuir* and *Freundlich* adsorption isotherm models.

Figure 3 - Adsorption isotherms of the herbicide atrazine (AT) onto EC (a) and ECB (b) samples, as well as the correlation with the isotherm models (*Langmuir* – solid line and *Freundlich* – dashed line).



Source: the author.

The values of the parameters and the fitting results obtained from the application of the adsorption isotherm models are presented in **Table 3**

Table 3 - Isotherm parameters for analyte adsorption onto the samples.

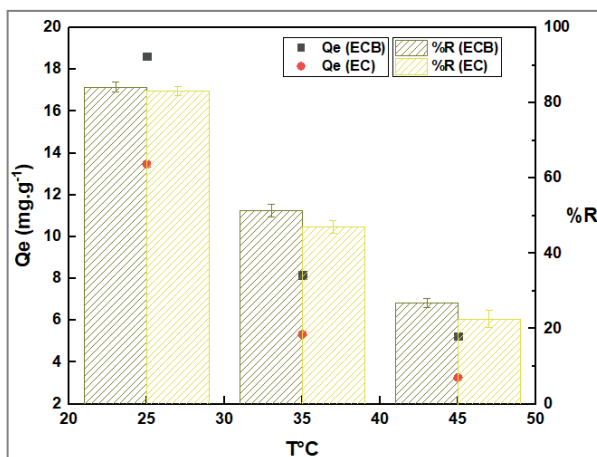
Samples	Isotherms models						
	Langmuir				Freundlich		
	R ²	K _L (L/mg)	Q _e Max.	R _L	R ²	K ^F (L/mg)	1/N
ECB	0.9981	12.8256	20.6124	0.2513	0.9873	0.01985	0.89423
EC	0.9901	6.2894	4.3897	0.1152	0.9764	0.01127	0.34821

Source: the author.

It was observed that the samples showed a better fit to the Freundlich model, as evidenced by the higher values of the coefficient of determination (R²). The n parameter of the Freundlich model, which represents the affinity of the adsorbent for the adsorbate, presented a higher value for the ECB sample compared to the EC sample. Similarly, the estimated maximum adsorption capacity (q_{max}) for ECB was higher than that of the EC sample.

Figure 4 shows the effect of temperature variation on the adsorption process of the analyte AT for the EC and ECB samples.

Figure 4 - Effect of temperature on atrazine adsorption by EC and ECB samples.



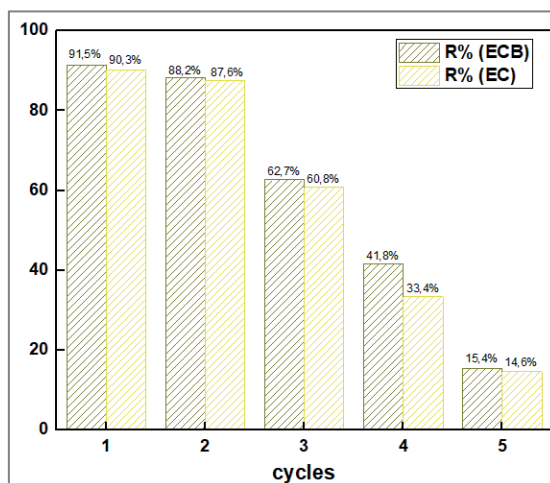
Source: the author.

In summary, the highest removal efficiency of the analyte was achieved at 25 °C, reaching 82.1% and 84.7% for EC and ECB, respectively. At higher temperatures, a reduction in the adsorption capacity of the analyte by the samples was observed.

Analysis of the material recycling test

The recyclability of the materials was evaluated according to a methodology adapted from El Messaoudi *et al.* (2024) through five successive regeneration cycles, considering the boiling point of the analyte, followed by adsorption for 240 min at 25 °C under constant agitation (**Figure 5**).

Figura 5 - Reusability efficiency of the samples over five adsorption cycles.



Source: the author .

In summary, it was observed that up to the third reuse cycle, the material maintained a high removal efficiency for the analyte. However, after the third cycle, a significant reduction in efficiency was observed, which may be attributed to the saturation of active sites and/or intrinsic mass loss resulting from the washing and centrifugation processes. Thus, it can be inferred that the materials exhibited a significant capacity for reactivation of the adsorption sites for up to three consecutive cycles.

DISCUSSION

Regarding the discussion of the experimental data obtained from the adsorption assays, it was verified that in the adsorbent dosage experiment the removal efficiencies of the analyte varied according to the adsorbent masses used in the adsorption process. A high removal efficiency was observed when a dosage of 1,0 g of the samples was applied. Thus, the increase in analyte removal efficiency with increasing adsorbent mass (dosage) can be attributed to the greater surface area available for adsorption. However, beyond a certain adsorbent mass, the increase does not promote further enhancement in adsorption due to possible interference between the binding sites of the adsorbent (HOLANDA *et al.*, 2023).

For both analyzed samples, the best fit of the kinetic data was described by the pseudo-first-order (PFO) model. This result suggests that the adsorption kinetic process occurred predominantly through physisorption mechanisms, in which *Van der Waals* intermolecular forces (dipole–dipole or induced dipole interactions) predominate. These interactions are characterized by wide-range but low-intensity forces, without involving electron transfer, and therefore represent a reversible process. Under these conditions, the analyte molecules are not fixed at specific active sites, allowing their mobility across the adsorbent surface and enabling the formation of multilayer adsorption, without altering the chemical nature of the adsorbate (SÖĞÜT & GÜLCAN, 2023).

With regard to the pH conditions established in the adsorption study, it is presumed that under acidic pH conditions, the ECB material becomes protonated, since it presents a pHPzc of approximately 7. In addition, the herbicide under study can be classified as a weak base, and under these reaction conditions, a fraction of the molecules exists in both the cationic form of triazine (the structural core of atrazine) and in a neutral form. Therefore, it can be suggested that the adsorption interaction presents a lower contribution of electrostatic forces. It is worth noting that previous studies have also reported that atrazine adsorption is favored under acidic conditions (PHAN *et al.*, 2022; WANG, Yi *et al.*, 2022).

Regarding the analysis of the adsorption isotherm models for the analyte, it was verified that the samples exhibited a better experimental fit to the *Langmuir* model. This model assumes that adsorption occurs as a monolayer on a homogeneous surface, where all active sites possess the same adsorption energy, being suitable for systems that reach a maximum adsorption capacity. Similar results have been reported in the literature, in which a better fit to the *Langmuir* model was observed for herbicide removal using agro-industrial residues as adsorbent materials (SAHA *et al.*, 2017; NETTO *et al.*, 2022; DO NASCIMENTO *et al.*, 2022).

Regarding the thermodynamic study of the system, the increase in temperature to 35 °C and 45 °C reduced the removal efficiency of the analyte for both samples compared to 25 °C, which exhibited the best experimental removal efficiency for AT. Previous studies suggest that increasing temperature generally enhances adsorption capacity by facilitating the diffusion of the analyte onto the biosorbent surface (GIRISH, 2025). However, the results obtained in this study

indicated a decrease in adsorption capacity with increasing temperature. This discrepancy may be attributed to the weakening of adsorption forces between the analyte and the active sites of the adsorbent at higher temperatures, resulting in a reduction in adsorption capacity (ZHAO *et al.*, 2018).

It was also observed that the materials maintained a high removal efficiency of the analyte up to the third reuse cycle. However, after this cycle, a significant decrease in efficiency was observed, which may be associated with the saturation of active sites and/or mass loss resulting from washing and centrifugation processes. These results suggest that the materials exhibit the capacity for reactivation of adsorption sites for up to three consecutive cycles.

CONCLUSION

In summary, the results indicated that the EC and ECB samples promoted high removal efficiency of the herbicide AT when a mass of 1,0 g of the materials was applied, since doubling the adsorbent mass resulted in a proportional increase in removal efficiency. Overall, the adsorption behavior of the materials was adequately described by the pseudo-first-order (PFO) kinetic model and the *Langmuir* isotherm, indicating that the predominant mechanism involves physisorption processes, mainly governed by *Van der Waals* intermolecular forces, without electron transfer, thus representing a reversible process. Under the pH conditions established for the adsorption study, the analyte, classified as a weak base, is partially present in both the cationic triazine form and a neutral form, resulting in a lower contribution of electrostatic interactions.

The best experimental fit for the thermodynamic parameters related to AT removal was observed at 25 °C, which can presumably be attributed to the weakening of the adsorption interactions between the analyte and the active sites of the adsorbent at higher temperatures, consequently reducing the adsorption capacity of the system. Furthermore, it was observed that the materials maintained the reactivation capacity of adsorption sites for up to three consecutive cycles.

Therefore, the use of agro-industrial residues as biosorbents represents an economically viable and environmentally sustainable alternative for the

removal of contaminants from aqueous effluents, contributing to the reduction of treatment operational costs, the valorization of agricultural by-products, and the mitigation of environmental impacts.

Acknowledge

The author acknowledge the support of the research funding agency.

AI Use Statement

Artificial intelligence tools were used solely to assist in language revision and text improvement. The scientific content, data analysis, and interpretation of results were entirely performed by the author, who take full responsibility for the manuscript.

REFERENCE

- AHMAD, M. *et al.* Adsorptive removal of atrazine from contaminated water using low-cost carbonaceous materials: A review. **Frontiers in Materials**, v. 9, p. 909534, 2022.
- BERGAMASCO, R.; VIEIRA, M. G. A.; SILVA, E. A. Adsorption processes applied to water treatment: removal of pesticides and emerging contaminants. **Water**, Basel, v. 15, n. 7, p. 1260, 2023.
- DA SILVA JÚNIOR, A. H. *et al.* Organochlorine pesticides remediation techniques: Technological perspective and opportunities. **Journal of Hazardous Materials Letters**, v. 5, p. 100098, 2024.
- DO NASCIMENTO, C. T. *et al.* Adsorption of atrazine from aqueous systems on chemically activated biochar produced from corn straw. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 107039, 2022.
- DUMITRIU, G. D.; TEODOSIU, C. Safety and Pesticides Removal by Emerging Technologies. **Grapes and wine**, p. 17, 2022.
- EL MESSAOUDI, N. *et al.* Regeneração e reutilização de adsorventes não convencionais de baixo custo para remoção de corantes de águas residuais em múltiplos ciclos consecutivos de adsorção-desorção: uma revisão. **Biomass conversion and biorefinery**, v. 14, n. 11, p. 11739-11756, 2024.
- GIRISH, C. R. Determination of thermodynamic parameters in adsorption studies: a review. **Chemical Papers**, v. 79, n. 9, p. 5687-5706, 2025.
- HASSAAN, M. A.; ELDEEB, T; EL NEMR, A. Pesticides removal techniques from the aquatic environment. *In: Pesticides in the natural environment*. Elsevier, 2022. p. 483-516.

- HERNANDES, P. T. *et al.* Adsorption of atrazine and 2, 4-D pesticides on alternative biochars from cedar bark sawdust (*Cedrella fissilis*). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 15, p. 22566-22575, 2022.
- HOLANDA, M. A. S. *et al.* Effectiveness of biochar as an adsorbent for pesticides: Systematic review and meta-analysis. **Journal of environmental management**, v. 345, p. 118719, 2023.
- HONG, J. *et al.* Degradation of residual herbicide atrazine in agri-food and washing water. **Foods**, v. 11, n. 16, p. 2416, 2022.
- JOSHI, M.; BHATT, D.; SRIVASTAVA, A. Enhanced adsorption efficiency through biochar modification: a comprehensive review. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 62, n. 35, p. 13748-13761, 2023.
- MEILI, L. *et al.* Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: experimental investigation and phenomenological modelling. **Progress in biophysics and molecular biology**, v. 141, p. 60-71, 2019.
- MORIN-CRINI, N. *et al.* Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments. A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, n. 2, p. 1333-1375, 2022.
- NETTO, Matias S. *et al.* Effective adsorptive removal of atrazine herbicide in river waters by a novel hydrochar derived from *Prunus serrulata* bark. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 3, p. 3672-3685, 2022.
- PHAN, K. A. *et al.* Preparation of rice husk hydrochar as an atrazine adsorbent: Optimization, characterization, and adsorption mechanisms. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 107575, 2022.
- ROY, A. *et al.* Role of microbes and nanomaterials in the removal of pesticides from wastewater. **International Journal of Photoenergy**, v. 2022, n. 1, p. 2131583, 2022.
- SAHA, A. *et al.* Linear and nonlinear sorption modelling for adsorption of atrazine onto activated peanut husk. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 36, n. 2, p. 348-358, 2017.
- SÖĞÜT, E. G.; GÜLCAN, M. Adsorption: basics, properties, and classification. *In*: **Adsorption through advanced nanoscale materials**. Elsevier, 2023. p. 3-21.
- WANG, Y. *et al.* Efficient removal of atrazine in wastewater by washed peanut shells biochar: Adsorption behavior and biodegradation. **Process Biochemistry**, v. 154, p. 22-34, 2025.
- WANG, Y. *et al.* Behavior and mechanism of atrazine adsorption on pristine and aged microplastics in the aquatic environment: Kinetic and thermodynamic studies. **Chemosphere**, v. 292, p. 133425, 2022.
- YU, F. *et al.* Adsorption of contaminants from aqueous solutions by modified biochar: a review. **Environmental Chemistry**, v. 19, n. 2, p. 53-81, 2022.
- ZHAO, B. *et al.* Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 977-987, 2018.
- ZHAO, H. *et al.* Toxicological effects of atrazine exposure in aquatic organisms. **Toxicology**, Amsterdam, v. 503, p. 153-165, 2024.
- ZHAO, L. *et al.* Characterization of modified biochars prepared at low pyrolysis temperature as an efficient adsorbent for atrazine removal. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 2, p. 1405-1417, 2018.
- ZHOU, J. *et al.* Highly selective and efficient removal of fluoride from ground water by layered Al-Zr-La Tri-metal hydroxide. **Applied Surface Science**, v. 435, p. 920-927, 2018.

BRAZILIAN BIOFUELS OVERVIEW

Artur Saturnino Rodrigues

Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valleys (UFVJM)

Adeline Cristina Pereira

Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valleys (UFVJM)

Juan Pedro Bretas Roa

Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valleys (UFVJM)

Vivian Machado Benassi

Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valleys (UFVJM)

ABSTRACT

Biofuels are considered excellent alternatives for reducing greenhouse gas emissions. Among the main biofuels produced in Brazil are biodiesel, ethanol, and bio-kerosene. The primary sources for biodiesel production are oilseed crops and residual fats, while the main sources for ethanol production are sugarcane, corn, and molasses. The principal pathways for bio-kerosene production include chemical, biochemical, and thermochemical routes. Brazil is currently in a favorable position, as it possesses both advanced technologies and high-quality raw materials for the production of high value-added biofuels. However, the cost of the process remains high, which still limits the implementation of industrial-scale production units. Therefore, existing technologies need to be improved in order to reduce process costs, while simultaneously increasing process efficiency and enabling the broader use of biofuels, such as bio-kerosene, particularly in the aviation sector.

Palavras-chave: Biodiesel; ethanol; bio-kerosene; renewable fuels.

INTRODUCTION

The adoption of biofuels in Brazil is driven by several factors, including the abundant availability of land and natural resources, favorable government policies, and concerns regarding greenhouse gas (GHG) emissions. Efforts are made to ensure that biofuel production is sustainable, including compliance with environmental and social guidelines. Brazil is one of the global leaders in the production and use of biofuels, with ethanol and biodiesel standing out (Gonçalves *et al.*, 2023).

Investments in research and development in the biofuels sector continuously seek ways to improve the efficiency and sustainability of production, significantly impacting the Brazilian economy through job creation and the strengthening of the agricultural sector (Martinelli *et al.*, 2022).

However, it is important to note that the expansion of biofuel production in Brazil still generates debates and concerns, especially regarding land use. Therefore, biofuel production is a complex topic that involves balancing energy demand, environmental sustainability, and the need to meet food demand. Public policies and regulations are continuously being adjusted to address these issues (Gonçalves *et al.*, 2023; Lazaro *et al.*, 2023).

Considering this scenario, one of the main sources of raw materials for biofuel production is biomass. Biomass is mainly composed of organic material, such as plants, agricultural, forestry, and food residues, as well as algae. Biomass is a valuable alternative to fossil fuels because it is renewable, helps reduce greenhouse gas emissions, contributes to energy security, and promotes the sustainable use of land and resources (Saravanan *et al.*, 2023).

Biomass is not only used for biofuel production; it currently represents the fourth most widely used source for electricity generation, accounting for 7.6% of the total energy consumed. This use has contributed to reducing the reliance on fossil fuels such as coal, natural gas, and petroleum derivatives for electricity generation, with a reported reduction of 52.9% in the use of non-renewable raw materials (National Energy Balance – BEN, 2023).

Another relevant aspect is the observed increase in investment in the biofuels and renewable resources sector, reaching R\$ 4.4 billion. These figures

represent a growth of 45.8% compared to 2022, as reported in the Statistical Yearbook of the oil, natural gas, and biofuels sector in Brazil (2023).

Additionally, the volume of obligations contained in the clauses of concession, production-sharing, and onerous assignment contracts related to investments in Research, Development, and Innovation (R&D&I) stands out. Nevertheless, there is still a considerable share of government contributions that drive the sector. In 2022, these contributions reached R\$ 118.6 billion, representing an increase of 52% compared to 2021 (ANP, 2023a).

Based on the above, it can be observed that the biofuels sector has strategic relevance considering the 2030 Agenda, particularly regarding the Sustainable Development Goals (SDGs) number 7 (Affordable and Clean Energy) and 12 (Responsible Consumption and Production), with SDG 7 being the one with the lowest level of investment by the United Nations in Brazil (2024). Strengthening the biofuels sector aims to promote efficiency while fostering sustainable business perspectives capable of reducing the negative impacts caused by the excessive use of fossil fuels. Therefore, this literature review presents the current scenario of biofuels in Brazil, highlighting the national production of biodiesel, ethanol, and bio-kerosene.

METHODOLOGY

This study was based on an exploratory documentary research approach through the collection of secondary data. Information was gathered from scientific articles and regulatory agencies that oversee activities related to the biofuel industry in Brazil, such as the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), the Energy Research Office (EPE), the Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply (MAPA), and the National Energy Balance (BEN).

This literature review aimed to present: (i) productivity data for bioethanol and biodiesel in Brazil; (ii) the Brazilian scenario regarding bio-kerosene productivity; and (iii) technologies for the production of aviation bio-kerosene. In this context, the present study provides an analysis of the Brazilian scenario, focusing on the most widely explored raw materials in the economy, the environment, and sustainability.

RESULTS AND DISCUSSION

RenovaBio

Since 2017, Brazil has been strengthening governmental incentives such as the National Biofuels Policy – RenovaBio, established by Federal Law No. 13,576 (2017), which aims to promote the controlled expansion of biofuel production and its integration into the Brazilian energy matrix. This policy supports the continuous supply of fuels and promotes improvements in energy efficiency during biofuel production through the use of less polluting products, while also seeking to minimize greenhouse gas (GHG) emissions. An important aspect of the policy is the authorization of a carbon credit market (Grangeia *et al.*, 2022).

As a result of RenovaBio, in 2022 the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels approved 99 efficient production certificates, enabling biofuel producers and importers to issue Decarbonization Credits. In this system, one ton of avoided CO₂ is equivalent to one decarbonization credit (CBIO). These environmental assets can be generated when certified biofuel producers and importers commercialize their products in the domestic market, according to the CBIO generation factor and the volume of biofuels traded.

The CBIOs generated are registered by financial institutions contracted by producers and importers and subsequently offered for sale on the Brazilian stock exchange, B3 – Brasil, Bolsa, Balcão. Fuel distributors, in turn, are required to acquire and retire a number of CBIOs equivalent to their individual mandatory targets for reducing GHG emissions.

CBIO prices showed rapid growth in early 2022. With an average price of R\$39 at the end of 2021, the value increased to approximately R\$100 between February and May, reaching around R\$200 during the second halves of June and July 2022. One of the factors suggested for this price increase was the perception of a potential shortage of CBIOs relative to the 2022 targets established for obligated parties under the public policy (NovaCana, 2022). It is estimated that biofuel producers received revenues of approximately R\$3.2 billion, of which R\$28.8 million originated from the commercialization of CBIOs (EPE, 2023).

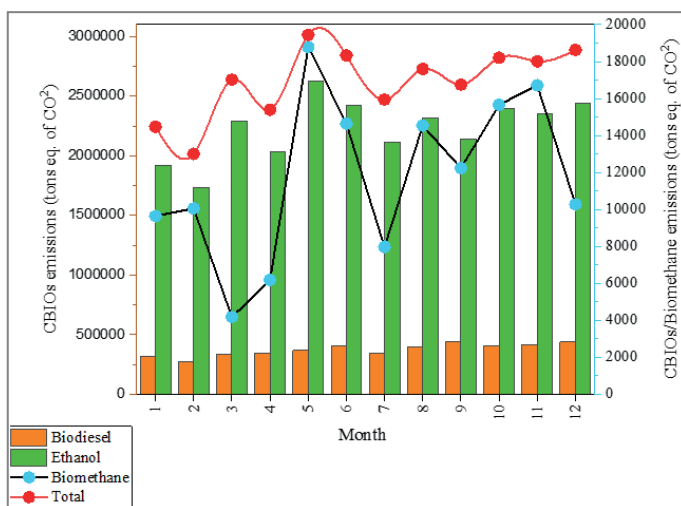
In 2022, certified biofuel producers and importers issued 31.4 million CBIOs, of which 85.25% were generated from ethanol production, as shown in Figure 1.

Avoided emissions resulting from the use of first-generation ethanol (derived from sugarcane and corn) and biodiesel in 2022 were 52.8 MtCO₂eq and 18.3 MtCO₂eq, respectively, totaling 71.1 MtCO₂eq (National Energy Balance – BEN, 2023).

The government, through the Future Fuel Program, has been supporting the energy transition, environmental protection, and the decarbonization of the economy (Chamber News Agency, 2024). The program also encourages the implementation of aviation bio-kerosene and stimulates the development of sustainable alternatives for the maritime sector. In addition, measures have been proposed for carbon capture during the production of biofuels, hydrogen, and second-generation (2G) ethanol.

The main objective of this program is to increase the share of sustainable fuels with low carbon emissions. Furthermore, the program seeks to integrate public policies such as RenovaBio, the National Program for the Production and Use of Biodiesel, and Rota 2030. New biofuels, such as green diesel (including Hydrotreated Vegetable Oil – HVO), Sustainable Aviation Fuel (SAF), and biomass-based hydrogen, are among the main highlights of this program (CNPE, 2021).

Figure 1 - Decarbonization Credits Issued by Biofuels in 2022.



¹Decarbonization Credits (CBIOs) correspond to 1 ton of avoided CO₂ and are issued by biofuel producers and importers certified by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). The unit corresponding to each column is MtCO₂eq.

Source: ANP, 2023.

Biodiesel

Biodiesel is a fuel produced through the transesterification of triacylglycerols. In this process, vegetable oils and animal fats react with a short-chain alcohol, such as methanol or ethanol, producing esters and glycerin. Biodiesel is currently used together with fossil diesel and supplied to the population as fuel for compression-ignition motor vehicles (Venugopal *et al.*, 2018). The process typically converts oils and fats into mono-alkyl esters of long-chain fatty acids, with glycerol generated as a by-product.

It is important to highlight that the National Energy Policy Council (CNPE) reduced the biodiesel content in diesel oil from 12% to 10% in November 2021. This reduction occurred during the pandemic and remained throughout 2022, resulting in a 7.6% decrease in the biofuels sector compared to 2021 biodiesel production. It is noteworthy that the blending of biodiesel with fossil diesel began in 2004, and there had been no setback such as that observed in 2021 and 2022. This situation also resulted in a decrease in the total consumption of methanol used in biodiesel production through the transesterification of vegetable oils and animal fats. The reduction was 6.5% compared to 2021, with total imports from Chile, Trinidad and Tobago, Venezuela, and the United States reaching 711.4 thousand m³ in 2022 (EPE, 2023).

In turn, glycerin is a co-product of biodiesel production and corresponds to approximately 10% (w/w) of the biofuel production process. Glycerin production also declined, reaching 551.9 thousand m³, which represents 10% less than in 2021. The largest volume of glycerin produced in Brazil occurred in the Midwest region (40.2% of the total), followed by the South (39.3%), Northeast (10.3%), Southeast (7.1%), and North (3.1%) (ANP, 2023a). Revenue obtained from the export of crude glycerin reached USD 206.4 million, 25.6% higher than in 2021. This increase in the commercialization of the co-product resulted from low availability and high market demand (EPE, 2023).

Another important point is that in January 2022 a new biodiesel commercialization system came into effect, replacing public auctions that were previously used to meet the requirement of blending biodiesel with fossil diesel. Under this new system, fuel distributors began purchasing biodiesel directly from manufacturers, following the regulations established by CNPE Resolution

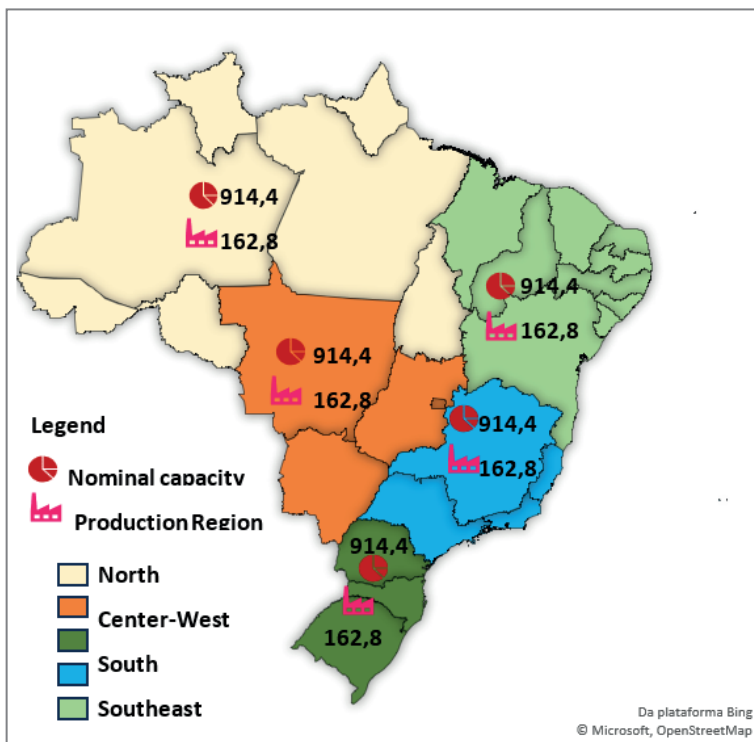
No. 14 (2020) and ANP Resolution No. 857 (2021). The objective was to directly benefit producers and increase the added value of the final product. In the first two months of 2022, the contracted volume recorded was about 36% higher than the initially estimated demand.

It is worth noting that on April 1, 2023, the biodiesel blending rate in diesel returned from 10% to 12%. According to the Official Gazette of the Union, which published Resolution No. 16 of the National Energy Policy Council (CNPE), the planned increases in biodiesel blending were established as follows: 13% in 2024, 14% in 2025, and 15% in 2026. Thus, in the coming years, a significant increase in the production and distribution of biodiesel in Brazil is expected, promoting the use of a more renewable energy resource.

Figure 2 shows that despite the decline in biodiesel production in Brazil, the Southern Region remained the largest producer, with an approximate volume of 2.6 million m³, equivalent to 42.4% of the national production. In the South and Midwest regions, decreases of 16.6% and 7.9%, respectively, were recorded. On the other hand, the Northeast, North, and Southeast regions increased their production volumes by 39.5%, 12.7%, and 5.4%, respectively. Additionally, the Midwest Region produced approximately 2.3 million m³, corresponding to 37.7% of the national total (ANP, 2023).

Among Brazilian states, Rio Grande do Sul was the largest biodiesel producer, with a volume of approximately 1.5 million m³, corresponding to 24.4% of the national total. In this state, production decreased by 17.8% compared to 2021. The second-largest producer was Goiás, with 1.1 million m³ produced (17.6% of the national total), followed by a 14.4% decrease in 2022 (Figure 2) (ANP, 2023a).

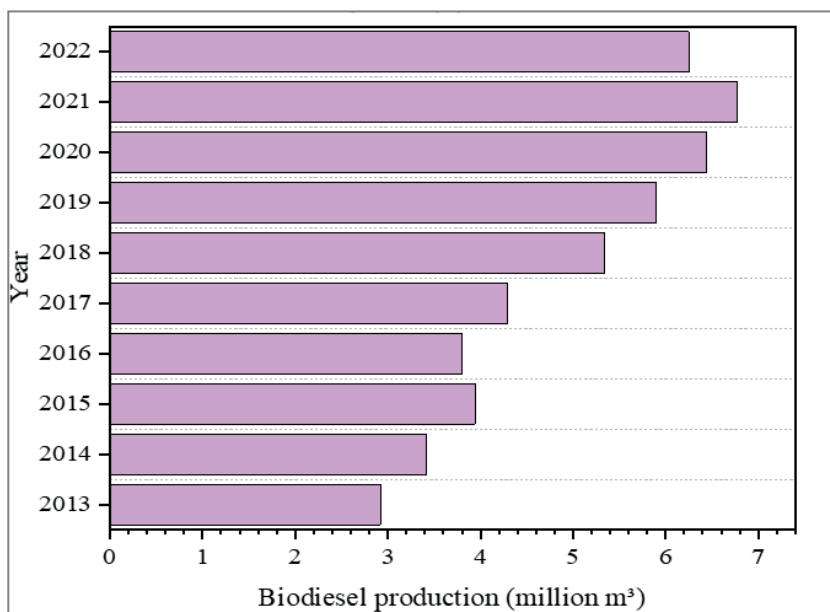
Figure 2 - Nominal biodiesel production capacity in Brazil (thousand m³ per year) in 2022.



Source: ANP, 2023.

In 2022, the nominal production capacity of biodiesel (B100) in Brazil was 13.7 million m³, equivalent to 37.4 thousand m³ per day of plant operation. However, the actual production was approximately 6.2 million m³, corresponding to 46.4% of the total installed capacity (Figure 3). From 2017 to 2021, there was an increase of nearly 44% in national biodiesel production, mainly due to government incentives (ANP/SPC, 2023).

Figure 3 - Evolution of biodiesel (B100) production between 2013 and 2022.

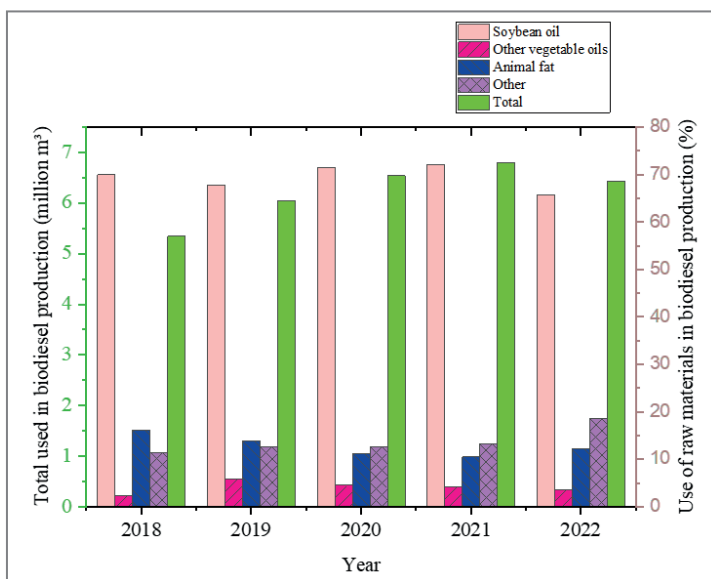


Source: ANP/SPC (tabela 4.10), 2023. Adapted.

In 2022, the most widely used raw material for biodiesel (B100) production was soybean, accounting for 65.8% of the total feedstock used. This represented a 13.9% decrease compared to 2021. On the other hand, there was a 31.7% increase in biodiesel production from used cooking oil and other fatty residues, as well as an increase of nearly 9% in animal fats, including beef, poultry, and pork fat (Figure 4).

An important aspect of this scenario was the introduction of new biodiesel production feedstocks in Brazil, adding greater value to the final product. One example is palm oil, which accounted for 2.1% of the total feedstock used in biodiesel production in 2022 (Figure 4) (EPE, 2023).

Figure 4 - Raw materials used in biodiesel (B100) production in Brazil between 2018 and 2022.



Other vegetable oils: include cottonseed oil, canola, sunflower, macaúba, corn, palm, and palm kernel oil; Animal fat: includes beef, poultry, and pork fat; Others: include used cooking oil and other fatty materials.

Source: ANP/SPC, according to ANP Resolution No. 729/2018. Adapted.

Ethanol

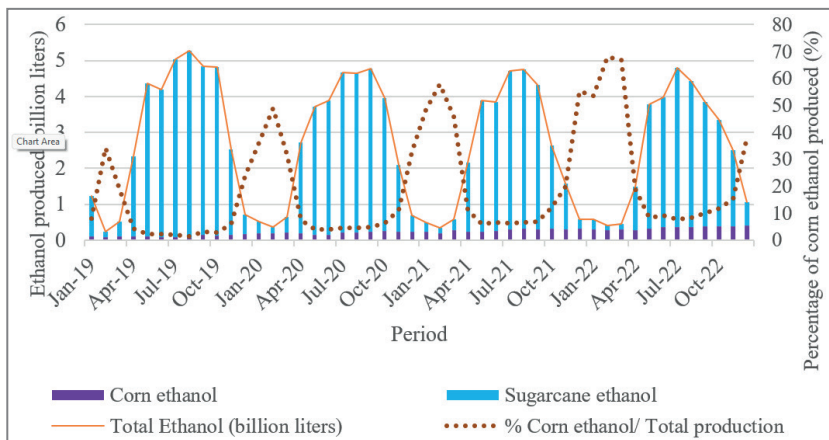
Ethanol is a clear, colorless, volatile, and flammable liquid with a partially pleasant and characteristic odor, chemically known as ethyl alcohol. It is an organic chemical compound belonging to the alcohol class, with the empirical formula C_2H_6O and a molecular weight of $46.07 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. It has been described as one of the most distinctive oxygen-containing organic compounds due to its combination of properties. Ethanol can be used in a wide variety of applications, such as a sanitizing agent, fuel, beverage component, and as a highly versatile chemical intermediate in industrial processes, including biodiesel production (Kolajo and Onovae, 2023).

Since the 1970s, ethanol has stood out as a biofuel in Brazil. Ethanol is mainly produced through the fermentation of sugars present in feedstocks such as sugarcane, corn, sugar beet, and other agricultural products rich in fermentable sugars. Compared with fossil fuels, the production process of this

biofuel is considered by some authors to be a more sustainable alternative, as it reduces CO₂ emissions into the atmosphere (Carneiro *et al.*, 2017).

Recent studies have demonstrated the importance of corn ethanol in meeting demand, especially during the off-season of sugarcane ethanol production. Furthermore, it contributes to lower price fluctuations throughout the year, as shown in Figure 5. The amount of corn processed for ethanol production increased from 3.4 million tons in 2019 to 9.7 million tons in 2022, representing a growth of 185%, and accounting for 8.5% of the total ethanol produced nationally (EPE, 2023).

Figure 5 - Monthly production of sugarcane and corn ethanol.



Source: EPE, 2023.

In 2022, corn accounted for 3.1% of the total feedstock used in ethanol production, while sugarcane represented 93% and molasses 3.6%. In 2023, corn accounted for 3.8%, molasses 3.8%, and sugarcane 92%. In the first months of 2024, corn represented 27%, molasses 6.4%, and sugarcane 66.2% of the feedstock used in ethanol production (ANP, 2024).

Anhydrous ethanol is an important additive and is blended with gasoline C, while hydrated ethanol is available at fuel stations for the direct fueling of motor vehicles. Anhydrous ethanol is characterized by containing a maximum water content determined by the Karl-Fischer method [IS:2362-1963] of 0.5%

at 15.6 °C. This dehydration is achieved through distillation and dehydration processes that remove most of the water present (Kumar *et al.*, 2010).

Water removal is essential to avoid combustion and storage problems in this biofuel. According to the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), anhydrous ethanol has had a proportional participation relative to gasoline C in the distribution market since March 16, 2015, and the current blending percentage of anhydrous ethanol is 27%. Hydrated ethanol, in turn, contains a significant amount of water, generally between 4% and 5% of its composition. One of the main uses of ethanol is as an automotive fuel in flex-fuel vehicles, which are equipped with engines designed to operate with variable mixtures of ethanol and gasoline (Wang *et al.*, 2022).

Thus, the main difference between anhydrous ethanol and hydrated ethanol lies in the amount of water present in their composition and their intended applications. Anhydrous ethanol is mainly used as a gasoline additive, while hydrated ethanol is used as a fuel for flex-fuel vehicles and in industrial applications that do not require high reagent purity.

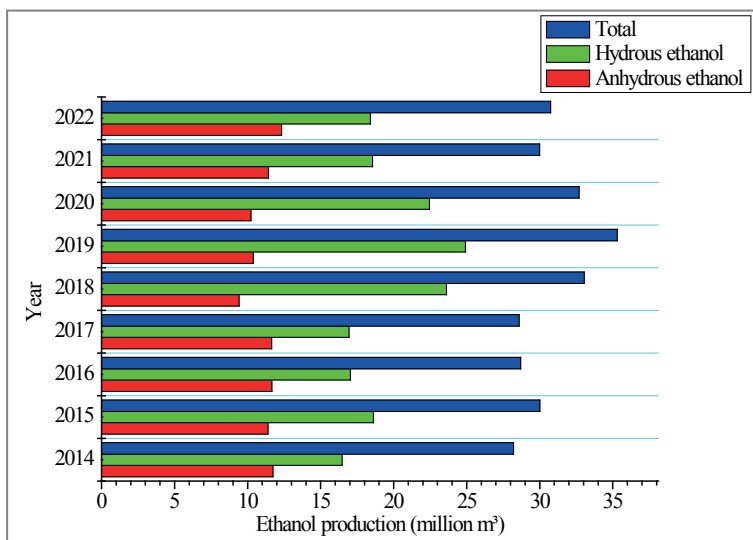
In 2022, the total ethanol production increased compared to 2021, reaching 30.7 billion liters (Figure 6). However, this increase was not the highest recorded in history, which occurred in 2019 with a total of 35.3 billion liters. It is important to note that the average productivity of sugarcane ethanol increased by 6.1% compared to 2021. During the 2022/23 harvest season, the Brazilian sugar-energy sector recorded an increase from 69.4 tC/ha to 73.6 tC/ha, with a smaller cultivated area but higher production (EPE, 2023).

In 2021, Brazil had 361 ethanol production facilities. In 2022, this number decreased to 358 facilities; in 2023, it increased to 359 facilities; and in 2024, 357 facilities are currently in operation. In 2023, these facilities produced 35.4 million m³ of ethanol, of which 21.5 million m³ corresponded to hydrated ethanol and 13.9 million m³ to anhydrous ethanol. In 2024, ethanol production facilities in Brazil were distributed as follows: 83 facilities in the Midwest, 56 in the Northeast, 4 in the North, 185 in the Southeast, and 29 in the South (ANP, 2024).

Hydrated ethanol production decreased by 0.8% in 2022 compared to 2021. The highest production of hydrated ethanol was recorded in 2019, with 24.91 billion liters. In 2022, anhydrous ethanol production reached a record level,

with an 8% increase compared to the previous year, totaling 12.33 billion liters produced. It was also observed that the average annual growth rate of ethanol production between 2013 and 2022 was 1.1%. Hydrated ethanol showed lower price competitiveness compared to gasoline C, which resulted in a 7.5% decline in its sales in 2022 (ANP, 2023a).

Figure 6 - Evolution of national production of anhydrous and hydrated ethanol between 2013 and 2022.



Source: ANP/SPC, according to ANP Resolution No. 729/2018 (Tables 4.2 and 4.3). Adapted.

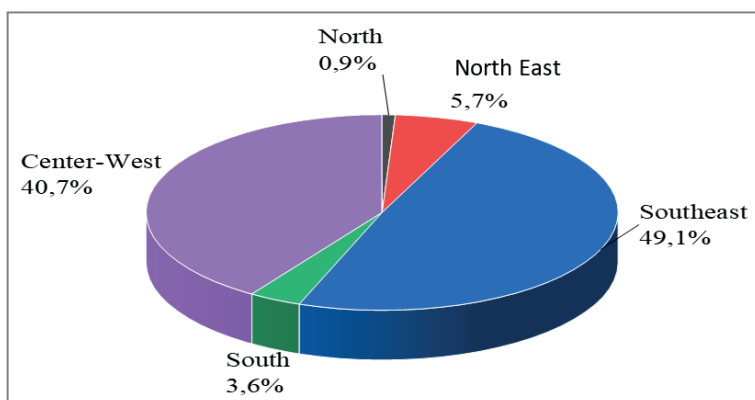
In the regional comparison, the Southeast Region stood out as the largest national producer of ethanol, accounting for 49.2% of the national total, with approximately 15 million m³ produced in 2022. This scenario represented a slight decrease of 0.2% compared to the volume produced in 2021. São Paulo was the leading state in ethanol production, responsible for 39% of the national production, with approximately 12 million m³ produced in 2022.

A reduction in ethanol production was also observed in the Northeast and South regions, with a 4.2% decrease in the Northeast, producing 1.8 million m³, and an 8.9% decrease in the South, totaling 1.1 million m³ of ethanol produced. Conversely, the Midwest and North regions recorded growth in 2022. In the Midwest, an 8.4% increase was observed, reaching 12.5 million m³ of ethanol produced, corresponding to 40.7% of the total produced in the country. The North

Region, in turn, showed a 5.3% increase in production volume, accounting for 0.9% of the national total (Figure 7).

In 2022, the national production of anhydrous ethanol reached 12.33 million m³, representing an 8% increase compared to 2021. Meanwhile, the average annual growth rate of anhydrous ethanol production between 2013 and 2022 was 0.4%. The Southeast Region was the largest producer of anhydrous ethanol, with approximately 6.9 million m³, corresponding to 55.8% of the national production, representing an increase of 3.6% compared to 2021. The North, Northeast, South, and Midwest regions also recorded increases in production (Figure 7).

Figure 7 - Percentage distribution of anhydrous and hydrated ethanol production by major regions in 2022.



Fonte: ANP/SPC, conforme a Resolução ANP nº 729/2018 (Tabela 4.1). Adaptado.

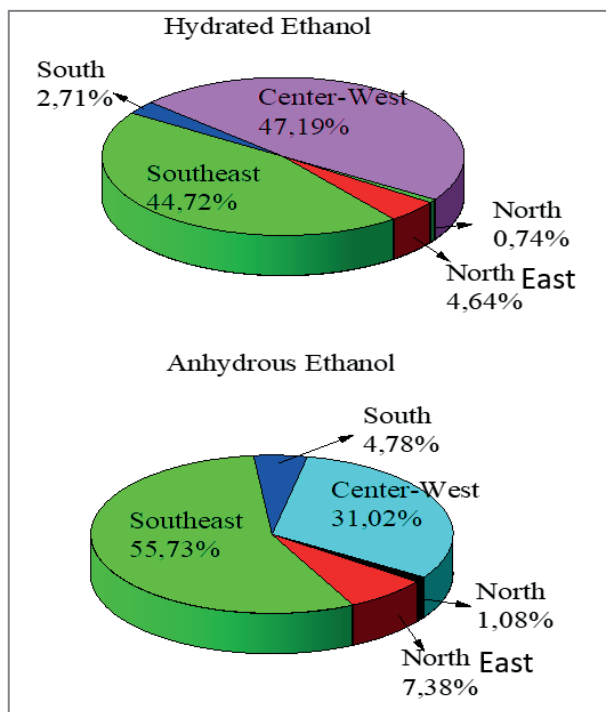
Among Brazilian states, São Paulo remained the largest producer of anhydrous ethanol, with 5.6 million m³, corresponding to 45.1% of the national production. In addition, it recorded the highest production of hydrated ethanol, with 6.4 million m³, representing 35% of the national production, despite a 4.4% decrease compared to 2021 (Figure 7).

The production of hydrated ethanol in 2022 exceeded 18 million m³, equivalent to more than 59% of the total national ethanol production (anhydrous and hydrated). The North and Midwest regions recorded increases in hydrated ethanol production of 9.8% and 4.2%, totaling 136.2 thousand m³ and 8.7 million m³, respectively. The other regions showed declines in production compared to 2021. In the South Region, the decrease was approximately 20%, reaching

498.3 thousand m³; in the Northeast, the reduction was 10.8%, with production of 854.6 thousand m³; and in the Southeast, the smallest percentage decline was observed (3.2%), with production of 8.2 million m³, corresponding to 44.7% of the total national production (Figure 8).

In 2024, nearly 2.6 million m³ of ethanol were produced, predominantly hydrated ethanol, following the production profile observed since 2017. By Brazilian regions, in 2023 the following volumes of ethanol were produced: 14.6 million m³ in the Midwest, 2.1 million m³ in the Northeast, 253.6 thousand m³ in the North, 17.2 million m³ in the Southeast, and 1.2 million m³ in the South.

Figure 8 - National production of anhydrous and hydrated ethanol in 2022.



Fonte: ANP, 2023. Adaptado.

Compared with January 2023, ethanol production in January 2024 was 32.4% higher (nearly 854 thousand m³ of ethanol). Comparing February 2023 and February 2024, an increase of 34% was observed (nearly 1.6 million m³ of ethanol) in the current year; in March, there was an increase of 25% (about 1.8

million m³ of ethanol); and in April, a reduction of 67% was recorded (about 853 thousand m³ of ethanol) (ANP, 2024).

Trade Balance: ethanol imports and exports

Brazil considers ethanol a significant product in its trade balance. In 2022, 315.9 thousand m³ of ethanol were imported, representing a 26.9% reduction compared with 2021. Of the total imported volume, 67.1% originated from the United States. On the other hand, Brazilian ethanol exports in 2022 showed strong growth, increasing 25.5% compared with 2021, with the exported volume reaching 2.4 million m³.

An important aspect was the growth of exports to the European market, which increased by 380%. The main markets supplied by Brazilian ethanol were the Asia–Pacific region, with 902.6 thousand m³ (37% of the total), and Europe, with 867.9 thousand m³ (35.6% of the total), as shown in Table 1 (ANP, 2023).

North America imported 470.5 thousand m³, while Africa imported 166.2 thousand m³. Countries in Central and South America imported a total of 32.1 thousand m³ of Brazilian ethanol. South Korea stood out as the main buyer of Brazilian ethanol, totaling 739.5 thousand m³ between 2018 and 2022 (Table 1) (ANP, 2023).

Table 1 - Ethanol exports by region between 2018 and 2022.

Regiões geográficas	Período					
	2018	2019	2020	2021	2022	22-21%
Total	1.678.687	1.940.305	2.651.703	1.944.723	2.439.885	25,46
América do Norte	933.179	1.211.957	1.028.034	471.070	470.452	-0,13
Américas Central/Sul	35.103	19.918	87.203	65.925	32.110	-51,29
Europa	49.245	71.111	406.240	180.810	867.883	380,00
Oriente Médio	-	-	15.466	1.239	603	-51,32
África	7.059	50.710	87.087	191.867	166.209	-13,37
Ásia-Pacífico	654.101	586.609	1.027.673	1.033.811	902.627	-12,69

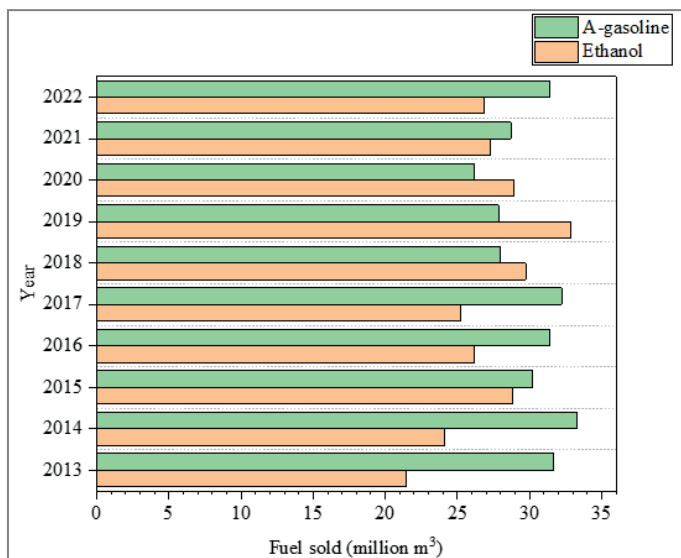
Fonte: ANP, 2023. Adaptado.

In 2022, three distribution companies accounted for 54.5% of hydrated ethanol sales in the national territory: Raízen, with a 19.3% share of the ethanol

made available to the market; Vibra Energia, with 18.4%; and Ipiranga, with 16.8%. The remaining 45.5% of ethanol was distributed by 124 other companies.

The combined sales of anhydrous ethanol (11.6 million m³) and hydrated ethanol (15.3 million m³) were lower than those of gasoline A (31.4 million m³), as shown in Figure 9 (ANP, 2023a).

Figure 9 - Ethanol¹ and gasoline A sales in Brazil.



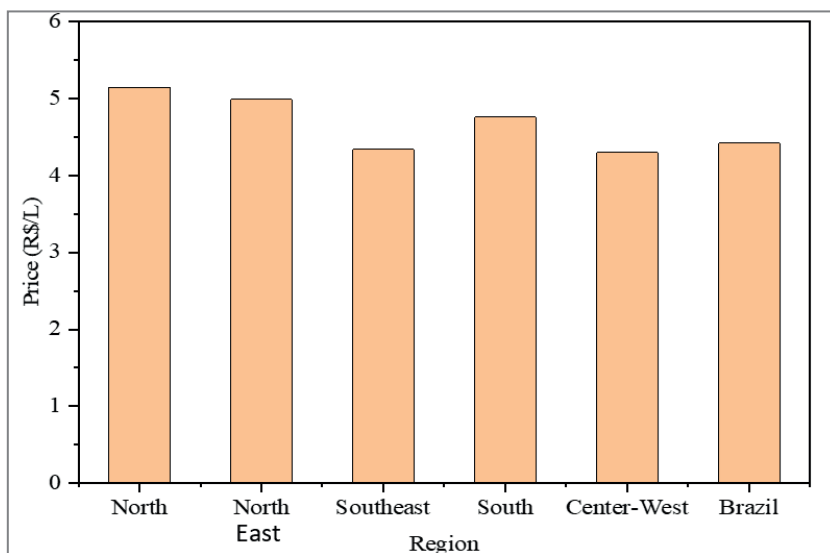
¹Includes sales of anhydrous and hydrated ethanol.

Source: ANP/SDL.

The average price of hydrated ethanol available to Brazilian consumers was R\$ 4.42 per liter in 2022, a year in which the U.S. dollar showed a considerable decrease (ranging between R\$ 5.70 and R\$ 4.62), representing a 2% increase compared with the price recorded in 2021 (Figure 10) (Ipeadata, 2024).

The lowest prices were observed in the Midwest Region (R\$ 4.30 per liter), particularly in the state of Mato Grosso (R\$ 4.10 per liter). The highest consumer cost was recorded in the North Region, where in the state of Amapá the price of hydrated ethanol reached R\$ 5.82 per liter (ANP, 2023a).

Figure 10 - Average consumer price of hydrated ethanol in 2022.



Note: Prices are presented in current values, meaning they may fluctuate throughout the year.

Source: ANP/SDC; Fuel Price and Marketing Margin Survey. Adapted.

Bio-kerosene

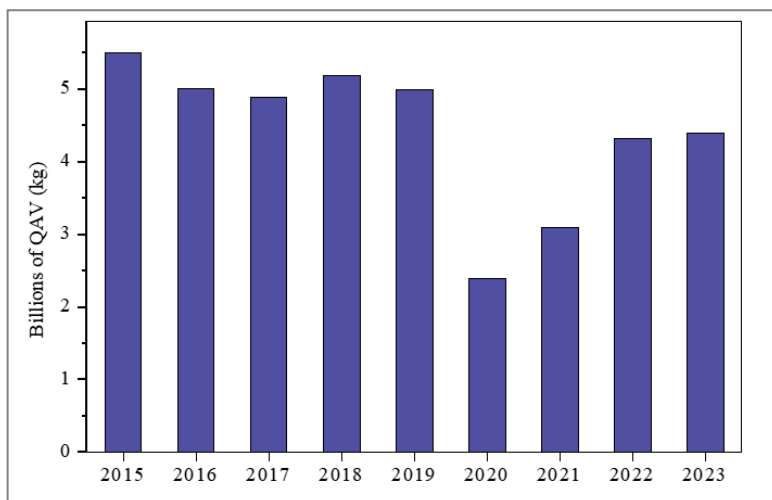
Bio-kerosene is a promising alternative to replace petroleum-derived kerosene obtained from refining processes involving distillation fractionation, as it presents similar performance to conventional fuel and produces lower gas emissions during combustion. Kerosene is a versatile product, used as a solvent, extraction agent, and raw material for the manufacture of other substances at the industrial level, in addition to being used in the production of paints and adhesives, cleaning of metal parts, mining operations, and pelletizing processes. However, its main application is in the air transportation sector, where it is used as fuel in both civil and military aviation (Yoshinaga *et al.*, 2020).

According to the research and consulting company Markets and Markets (2023), the global aviation fuel market reached USD 249.9 billion in 2022 and is expected to reach USD 696.2 billion by 2030.

The United States, Germany, and France are the three countries that dominate this fuel market. On the other hand, Brazil ranks first as the largest consumer of aviation fuels among Latin American countries. Figure 11 shows

aviation fuel consumption in Brazil in recent years according to the National Civil Aviation Agency (ANAC, 2024). As can be observed, consumption levels fluctuated between 2019 and 2021, particularly influenced by the epidemic caused by the SARS CoV 2 virus. The sector's figures showed growth in 2022 and 2023. Despite the increase in consumption, the levels recorded in 2019 for aviation kerosene consumption have not yet been surpassed.

Figure 11 - Estimated annual aviation kerosene consumption in Brazil.



Source: National Civil Aviation Agency (ANAC), 2024.

When burned, kerosene emits hazardous pollutants such as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), unburned hydrocarbons (UHC), particulate matter (PM), nitrogen oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x), and excess atmospheric gases such as oxygen and nitrogen. The uncontrolled emission of greenhouse gases into the atmosphere contributes to global warming (Daggett *et al.*, 2008).

The aviation sector is estimated to account for 2.5% of global atmospheric pollutant emissions. Although this percentage is relatively low, uncontrolled greenhouse gas emissions can lead to harmful consequences, which encourages the search for solutions aimed at reducing emissions from fossil fuels. This effort is also aligned with the 2030 Agenda, particularly SDG 12 (Responsible Consumption and Production)—which aims to substantially reduce waste generation through prevention, reduction, recycling, and reuse—and SDG 7

(Affordable and Clean Energy), which seeks to significantly increase the share of renewable energy in the global energy matrix by 2030 (Sousa *et al.*, 2018; United Nations, 2024).

Population growth and the development of new consumption habits driven by technological advances have led to increasing projections for the aviation sector. As aviation, like automobiles, depends heavily on fossil-derived fuels, the sector must assume an important role in environmental protection. Therefore, environmental and economic regulations are required to enable the production and consumption of fuels derived from sustainable energy resources (Yilmaz & Atmanli, 2017).

In October 2021, 290 companies from 120 countries belonging to the International Air Transport Association approved a commitment to gradually reduce the net carbon dioxide (CO₂) emissions of commercial aviation by 2050, when flights are expected to become carbon-neutral (Zaparolli, 2022). One alternative to meet these targets is the production and use of alternative aviation kerosene (AKJ).

According to the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP, 2023b), alternative aviation kerosene can be obtained from sources such as biomass, residual gases, solid waste, coal, and natural gas. Among these fuels, bio-kerosene stands out, as it can be produced from sugars, starch, oils, biomass, and residual materials. Biomass sources such as sugarcane, soybean, eucalyptus, jatropha, babassu, and castor bean are among those used for the production of this biofuel (Yoshinaga *et al.*, 2020).

The production of aviation bio-kerosene is still limited because feedstocks contain considerable levels of impurities based on nitrogenated and oxygenated compounds, which must be removed to improve product quality and increase process yield (Burov *et al.*, 2023; Why *et al.*, 2019). Consequently, higher reaction temperatures are required to convert carboxylic acids and oxygenated compounds into hydrocarbon chains. The conversion of oxygenated compounds can occur through cracking, decarboxylation, hydrocracking, decarbonylation, hydrodeoxygenation, and hydrogenation, typically in the presence of solid catalysts based on nickel and iron (Al-Muttaqii *et al.*, 2019).

Bio-kerosene production processes occur through several pathways, including chemical routes such as the transesterification of vegetable oils and animal fats; biochemical routes, using genetically modified yeasts or bacteria capable of metabolizing sugars to produce hydrocarbons; and thermochemical routes, involving catalytic cracking or gasification followed by catalytic synthesis (Bonassa *et al.*, 2014).

Hydrocarbons can also be produced by converting lipids into saturated carbon compounds (paraffins) through the insertion of hydrogen into chemical structures rich in double bonds and oxygen atoms. This process can be integrated with biodiesel synthesis pathways and petroleum refining, reducing associated costs and promoting the diversification of value-added products (Cortez *et al.*, 2014).

Production and technologies related to Aviation Biofuels in Brazil

The aviation sector in Brazil requires technologies capable of maximizing fuel decarbonization, making them more sustainable at a commercial scale. One of the technologies implemented in recent years is hydrothermal liquefaction, which helps meet the high demand for fuel while reducing greenhouse gas emissions. This technology has gained relevance due to the high availability of agro-industrial residues in Brazil (Deuber *et al.*, 2023). Hydrothermal liquefaction is a thermal depolymerization process of wet biomass, producing bio-oil with high energy density (Lee *et al.*, 2023).

One limitation of this technology is its economic viability, although this constraint can be partially mitigated by carbon credit incentives. Among the most accessible feedstocks that could help reduce production costs is sugarcane bagasse. Its use in hydrothermal liquefaction technology can reduce up to 82% of the environmental impacts associated with fossil aviation fuels. However, this reduction is still insufficient to make the biofuel fully competitive, as carbon credit incentives are not yet enough to offset production costs (Deuber *et al.*, 2023).

Oils extracted from grains, such as gueiroba, are also promising alternatives for producing aviation fuels with lower production costs and reduced environmental impacts. Biodiesel produced from the lighter fractions of the

extracted oil can be used in aircraft propulsion, provided that the concentration does not exceed 5%. Biodiesel produced from short-chain fatty acids presents density, free water content, calorific value, and freezing point within the limits established for aviation fuels. Therefore, technologies for producing and blending biodiesel from alternative feedstocks represent an opportunity to improve the aviation fuel landscape in Brazil (Chagas *et al.*, 2023).

Aviation fuels can also be improved through the addition of diamyl ether, where the biofuel acts as an additive that enhances physicochemical properties and fuel characteristics. This biofuel has shown superior potential compared with conventional aviation fuel, as melting point, boiling point, flash point, and freezing point are significantly improved. The use of this additive may promote economic competitiveness, since it represents an alternative fuel with improved combustion properties (Avila *et al.*, 2023).

Other technologies, such as the use of photoelectrocatalysts capable of producing biofuels, are being investigated to reduce the effects caused by excessive emissions of toxic gases into the atmosphere. In this approach, nanomaterial compounds are used to produce alternative biofuels through the molecular splitting of water and organic matter. With this technology, the diversification of biofuels and industrial-scale production methods may become a realistic possibility for Brazil (Dazon *et al.*, 2024).

Operational costs for aviation fuel production remain high, and the use of biofuels is limited due to strict purity requirements for energy sources. On the other hand, the environmental impacts caused by excessive fossil fuel consumption stimulate continuous research into less polluting fuels (Dazon *et al.*, 2024; López *et al.*, 2024).

In this context, it is possible to produce bioturbine fuel from coconut oil through ultrasound-optimized transesterification reactions. Bioturbine fuel is a biomass-derived fuel with high conversion rates in shorter reaction times, as well as lower water content and fewer impurities. As a result, this fuel represents a promising alternative for reducing greenhouse gas emissions and supporting aviation transportation (López *et al.*, 2024).

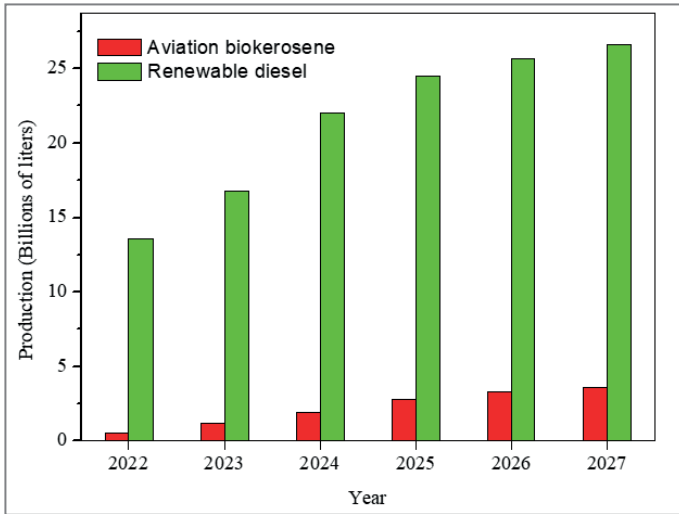
Used cooking oils also represent promising alternatives for the synthesis of more sustainable biodiesel. The synthesis methods involve transesterification

and hydrocracking, which achieve high conversion rates while meeting strict quality standards. Thus, the biofuel production method itself is also crucial, as processes must be developed that ensure operational feasibility, economic viability, and sustainability (El-Araby *et al.*, 2020; Penteadó *et al.*, 2024).

Alternative biofuels have the potential to partially or completely replace fossil fuels, provided they meet market and environmental requirements. As a result, an increasing use of biomass in biochemical, thermochemical, and chemical conversion processes has been observed. However, it is important to critically examine the development of these technologies, since advances in the formulation of alternative fuels still face challenges related to energy efficiency and greenhouse gas emissions (Rost *et al.*, 2023).

Figure 12 presents the estimated production until 2027 of the main biofuels derived from renewable sources, namely renewable diesel and aviation bio-kerosene. It can be observed that renewable diesel shows a greater production trend, whereas bio-kerosene presents lower estimated production levels. This difference may be explained by the more stringent chemical composition requirements for bio-kerosene compared with diesel, particularly because the water content in biofuels is generally higher than in fossil fuels. Therefore, the development of technologies that facilitate the production of aviation bio-kerosene is essential, enabling its expanded use in the aviation sector and significantly reducing dependence on fossil fuels.

Figure 12 - Estimated production (in billions of liters) of renewable diesel and aviation bio-kerosene.



Source: IEA, 2023.

Although government programs have emerged in Brazil to encourage the use of bio-kerosene in air transport, such as the National Biokerosene Program, established by Law No. 14,248 of November 25, 2021, which promotes research incentives and the development of energy production based on biomass, there is still a strong dependence on fossil fuels. Therefore, it is necessary to seek new incentive mechanisms for the generation and use of bio-kerosene, since climate conditions and environmental preservation are essential for maintaining the planet's ecosystems.

CONCLUSIONS AND FUTURE PERSPECTIVES

Energy has become increasingly indispensable for the development of humanity. However, the growing demand for energy brings major concerns, particularly environmental problems associated with climate change. The transport sector, responsible for a significant share of emissions, is one of the segments that must implement policies and strategies to mitigate undesirable effects and ensure environmental sustainability for future generations.

In this context, biofuels represent key alternatives to fossil-based fuels. Regarding the productivity of bioethanol and biodiesel in Brazil, the country

occupies a prominent position, as it has extensive land available for feedstock production and highly advanced technologies for biofuel production processes. These factors create significant economic opportunities, particularly due to the strong potential for exporting both biofuels and related production technologies.

With respect to bio-kerosene productivity in Brazil, a wide variety of feedstocks and production technologies can be observed. However, the products generated are still less efficient than fossil fuels, mainly due to the presence of impurities and the high production costs. In addition, aviation bio-kerosene production technologies have intensified in recent years, particularly through techniques aimed at improving both process efficiency and product quality, thereby increasing competitiveness in the aviation fuel market.

Nevertheless, it is essential that the development of new technologies and production routes for biofuels respects the principles of environmental sustainability, since the excessive use of a specific resource may generate new environmental problems. Countries such as Brazil, which possess diversified biofuel production technologies, can significantly improve environmental conditions. However, the use of these technologies must be encouraged by governments, as some production processes remain more expensive than traditional petroleum refining methods.

Thus, it can be concluded that significant challenges still need to be overcome to further strengthen the bioenergy sector, including increasing production efficiency, reducing production costs, improving logistics and transportation and storage infrastructure, and ultimately surpassing the performance of fossil fuels.

Acknowledgments

The authors thank Federal University of Jequitinhonha and Mucury Valleys, to the Institute of Science and Technology (ICT), the Postgraduate Program in Biocombustible, to the Laboratory of Mycology, Enzymology and Product Development (LMEDP) for institutional support. Thanks also to and to the funding agencies CNPq and FAPEMIG and to the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES) – Funding Code 001 for the support in the development of this work.

REFERÊNCIAS

- Al-Muttaqii, M., Kurniawansyah, F., Prajitno, D. H., & Roesyadi, A. (2019). Bio-kerosene and bio-gasoil from coconut oils via hydrocracking process over Ni-Fe/HZSM-5 catalyst. **Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis**, *14*(2), 309–319. <https://doi.org/10.9767/BCREC.14.2.2669.309-319>.
- ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. (2024). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil**. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas Da Aviação Civil. <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/meio-ambiente/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-da-aviacao-civil>.
- ANP. (2023a). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2023. <https://www.gov.br/anp>.
- ANP. (2023b). Combustíveis de aviação. **Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao>.
- Avila, A. G., Missaggia, A. B., da Silva, D. J. C., Rocha, L. A. O., Lorenzini, G., & Caetano, N. R. (2023). Economic and Competitiveness Analysis of Di-Amyl Ether as an Aviation Biofuel. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, *110*(1), 17–39. <https://doi.org/10.37934/ARFMTS.110.1.1739>.
- Balanço energético nacional - BEN. (2023). Anuário do balanço energético nacional 2023. <http://www.epe.gov.br>.
- Bonassa, G., Schneider, L. T., Frigo, K. D. de A., Cunha, F. S. da, Lins, M. A., & Frigo, E. P. (2014). Bioquerosene: Um Estudo de Caso. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, *3*(2). <https://doi.org/10.5380/rber.v3i2.37711>.
- Burov, N. O., Savelenko, V. D., Ershov, M. A., Vikhritskaya, A. O., Tikhomirova, E. O., Klimov, N. A., Kapustin, V. M., Chernysheva, E. A., Sereda, A. V., Abdellatief, T. M. M., Ramadan, M., & Abdelkareem, M. A. (2023). Knowledge contribution from science to technology in the conceptualization model to produce sustainable aviation fuels from lignocellulosic biomass. **Renewable Energy**, *275*, 118898. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.06.019>.
- Carneiro, M. L. N. M., Pradelle, F., Braga, S. L., Gomes, M. S. P., Martins, A. R. F. A., Turkovics, F., & Pradelle, R. N. C. (2017). Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, *73*, 632–653. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.01.152>.
- Chagas, S. P., Santos, D. Q., Fabris, J. D., Harter, L. V. L., & da Silva, J. Q. (2023). Light Fatty Acid Methyl Esters in Biodiesel Derived from the Gueiroba (*Syagrus oleracea*) Kernel Oil to Blend with Jet-A1 Kerosene for Aviation Fuel. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, *34*(3), 390–400. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20220116>.
- CNPE. (2021). Programa Combustível do Futuro (Resolução CNPE no 7/2021) 12a Memória da Reunião de 23/12/2021. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-comercializacao-de-biodiesel:primeiro-bimestre-no-novo-modelo-tem-contratacao-acima-da-meta>.
- (2023). **Ministério de Minas e Energia**. https://www.gov.br/anp/pt-br/canal_atendimento/impressa/noticias-comunicados/comercializacao-de-biodiesel-primeiro-bimestre-no-novo-modelo-tem-contratacao-acima-da-meta.

Cortez, A. B., Nigro, F. E. B., Nassar, A. M., Cantarella, H., Nogueira, L. A. H., Moraes, M. A. F. D. de, Leal, R. L. V., Franco, T. T., & Schuchardt, U. (2014). Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil: a flightpath to aviation biofuels in Brazil. <https://repositorio.usp.br/item/002955202>.

Daggett, D. L., Hendricks, R. C., & Walther, R. (2008). Alternate Fuels for Use in Commercial Aircraft. <http://www.sti.nasa.gov>.

Dazon, C., Pereira, M. C., & Monteiro, D. S. (2024). Biofuels and hydrogen production: back to the Langmuir–Blodgett approach for large-scale structuration of Bi-based photoelectrodes. **Energy Advances**, *3*(5), 945–961. <https://doi.org/10.1039/D3YA00627A>.

Deuber, R. de S., Bressanin, J. M., Fernandes, D. S., Guimarães, H. R., Chagas, M. F., Bonomi, A., Fregolente, L. V., & Watanabe, M. D. B. (2023). Production of Sustainable Aviation Fuels from Lignocellulosic Residues in Brazil through Hydrothermal Liquefaction: Techno-Economic and Environmental Assessments. **Energies**, *16*(6), 2723. <https://doi.org/10.3390/EN16062723/S1>.

Diário Oficial da União traz a Resolução no 16 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). (2023). **Despacho do presidente da república**. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-473383252>.

El-Araby, R., Abdelkader, E., El Diwani, G., & Hawash, S. I. (2020). Bio-aviation fuel via catalytic hydrocracking of waste cooking oils. *Bulletin of the National Research Centre 2020 44:1*, *44*(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/S42269-020-00425-6>.

EPE. (2023). Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2022. <http://www.mme.gov.br/http://www.epe.gov.br>.

Gonçalves, T. dos S., Oro, C. E. D., Wancura, J. H. C., dos Santos, M. S. N., Junges, A., Dallago, R. M., & Tres, M. V. (2023). Challenges for energy guidelines in crop-based liquid biofuels development in Brazil. **Next Sustainability**, 100002. <https://doi.org/10.1016/J.NXSUST.2023.100002>.

Grangeia, C., Santos, L., & Lazaro, L. L. B. (2022). The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. **Energy Conversion and Management**, *X*, *13*, 100156. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2021.100156>.

IEA. (2023). Dados Estatísticas. **International Energy Agency**. <https://www.iea.org/data-and-statistics?type=forecasts-estimates#data-tool-types>.

Kolajo, T. E., & Onovae, J. E. (2023). Biochemical conversion of waste paper slurries into bioethanol. **Scientific African**, *20*, e01703. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.E01703>.

Kumar, S., Singh, N., & Prasad, R. (2010). Anhydrous ethanol: A renewable source of energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, *14*(7), 1830–1844. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.03.015>.

Lazaro, L. L. B., Grangeia, C. S., Santos, L., & Giatti, L. L. (2023). What is green finance, after all? – Exploring definitions and their implications under the Brazilian biofuel policy (RenovaBio). **Journal of Climate Finance**, *2*, 100009. <https://doi.org/10.1016/J.JCLIMF.2023.100009>.

Lee, J., Lin, K. Y. A., Jung, S., & Kwon, E. E. (2023). Hybrid renewable energy systems involving thermochemical conversion process for waste-to-energy strategy. **Chemical Engineering Journal**, *452*, 139218. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.139218>.

López, L., Domínguez, G., Antuñano, Z., Ignacio, D., García, G., Zieliński, M., Kazimierowicz, J., Eduardo Esquerre Verastegui, J., López López, A., Adrián González Domínguez, R., Antonio Zamora Antuñano, M., Vidal Dávila Ignacio, C., & García García, R. (2024). Production of Coconut Oil Bioturbosine without Water by Using Ultrasound as a Source of Energy and Ion Exchange for Its Purification. **Energies** 2024, Vol. 17, Page 614, 17(3), 614. <https://doi.org/10.3390/EN17030614>.

Markets e Markets. (2023). Aviation Fuel Market Size Growth Opportunities Industry Trends and Analysis 2030. **Aviation Fuel Market**. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/aviation-fuel-market-231148230.html?gad_source=1&gclid=EAlaQobChMli-Kz_qrPgwMVsUFIAB0-HgybEAAYAiAAEgEr_D_BwE.

Martinelli, F. S., Biber-Freudenberger, L., Stein, G., & Börner, J. (2022). Will Brazil's push for low-carbon biofuels contribute to achieving the SDGs? A systematic expert-based assessment. **Cleaner Environmental Systems**, 5, 100075. <https://doi.org/10.1016/J.CESYS.2022.100075>.

Penteado, E. D., Diniz, A. A. R., Asencios, Y. J. O., da Silva Martins, L. H., de Oliveira, J. A. R., & Komesu, A. (2024). Comparative Analysis of Biojet Fuel Production from Different Potential Substrates. 61–84. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8783-2_4.

Rost, É., de Queiroz, L. A., & Pasquini, D. (2023). Biofuels from Biomass. **Handbook of Biomass**, 1–29. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6772-6_44-1.

Saravanan, A., Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Vickram, A. S., Karishma, S., Kamalesh, R., & Rangasamy, G. (2023). Techno-economic and environmental sustainability prospects on biochemical conversion of agricultural and algal biomass to biofuels. **Journal of Cleaner Production**, 414, 137749. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137749>.

Sousa, L. P. R., Franco, T. C., Araújo, T. M., & Ramos, G. Q. (2018). COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS PARA AVIAÇÃO. **Acta Mechanica et Mobilitatem**, 2(3), 27–33. <https://amm.demec.ufmg.br/index.php?journal=revista&page=article&op=view&path%5B%5D=38>.

Venugopal, B., Satyanarayana, P. A., Das, A., & Sridevi, V. (2018). Transterification of Used Cooking Oil and Jatropa Oil: Standardization of Process Parameters and Comparision of Fuel Characteristics. **Materials Today: Proceedings**, 5(9), 18002–18010. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.06.133>.

Wang, X., Gao, J., Chen, Z., Chen, H., Zhao, Y., Huang, Y., & Chen, Z. (2022). Evaluation of hydrous ethanol as a fuel for internal combustion engines: A review. **Renewable Energy**, 194, 504–525. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2022.05.132>.

Why, E. S. K., Ong, H. C., Lee, H. V., Gan, Y. Y., Chen, W. H., & Chong, C. T. (2019). Renewable aviation fuel by advanced hydroprocessing of biomass: Challenges and perspective. **Energy Conversion and Management**, 199, 112015. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112015>.

Yılmaz, N., & Atmanlı, A. (2017). Sustainable alternative fuels in aviation. **Energy**, 140, 1378–1386. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.07.077>.

Yoshinaga, F., Santos, A. da S., Moura, B. F. S. de, & Bortoleto, G. G. (2020). Bioquerosene para aviação: cenário atual e perspectivas futuras. **Bioenergia Em Revista: Diálogos**, 73–91. <https://www.fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/view/369/373780>.

Zaparroli, D. (2022). O desafio do setor aéreo para anular sua pegada de carbono. **Revista Pesquisa Fapesp**. <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-desafio-do-setor-aereo-para-anular-sua-pegada-de-carbono/>.

BIOTECHNOLOGICAL ADVANCES AND PROCESS OPTIMIZATION IN CORN BASED BIOETHANOL PRODUCTION: ENHANCING YIELD, SUSTAINABILITY AND INDUSTRIAL EFFICIENCY

Nelson Raniery Barbosa Rodrigues

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Thais Azevedo Costa

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Tarcisio Michael Ferreira Soares de Oliveira

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Vivian Machado Benassi

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

Juan Pedro Bretas Roa

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

ABSTRACT

The transition to renewable energy sources has promoted the adoption of biofuels, with bioethanol recognized as a significant alternative to fossil fuels. Corn is identified as a primary feedstock due to its widespread availability and high starch content, which are essential for the production of fermentable sugars. Central roles in this advancement are attributed to biotechnology, including crop improvement and the optimization of industrial process efficiency. Ethanol production from corn is achieved through sequential stages such as grinding, starch hydrolysis, fermentation, and distillation, resulting in high-purity ethanol and generating byproducts such as dried distillers' grains that enhance process sustainability. Recent biotechnological advances have enabled significant improvements in this system, particularly through the development of more efficient enzymes and genetically modified microorganisms that increase yield and industrial productivity. In Brazil, the use of corn as a feedstock for ethanol production is expanding, especially in the Midwest region, as a result of high grain availability and increased sector investment. The sustainable nature of corn-based bioethanol is demonstrated by its positive energy balance, reduced greenhouse gas emissions, and effective utilization of byproducts. Consequently, corn-based bioethanol is regarded as a promising alternative within the current energy landscape.

Keywords: Bioprocess; energy efficiency; industrial processes; innovation.

INTRODUCTION

Current Energy Context

The growing demand for renewable energy sources has driven the development and consolidation of biofuels as alternatives to fossil fuels. This trend is primarily driven by the need to reduce greenhouse gas (GHG) emissions, the pursuit of greater energy security, and the diversification of the global energy mix (International Energy Agency, 2023). Thus, bioethanol stands out as one of the most significant biofuels, being widely used in various countries as a partial or total substitute for gasoline (ZABED *et al.*, 2017).

Among the different raw materials used for bioethanol production, corn plays a prominent role, especially in countries such as the United States, where its high availability and high starch content favor its large-scale use (BOTHAST; SCHLICHER, 2005). Starch, the main component of corn accounting for 60 to 70% of the grain, forms the basis for the production of fermentable sugars, which are subsequently converted into ethanol through biochemical processes (TESTER; KARKALAS; QI, 2004). Thus, understanding the structural and functional characteristics of starch is essential for understanding the efficiency of the production process.

In addition to aspects related to the raw material, advances in conversion technologies have contributed significantly to the optimization of bioethanol production. The application of biotechnological tools, such as the development of more efficient enzymes and the genetic modification of microorganisms, has enabled improvements in the yield and economic viability of the process (AGHAEI *et al.*, 2022). These innovations play a fundamental role in establishing bioethanol as a sustainable and competitive alternative.

Globally, corn production and its use for energy generation have grown significantly, reflecting the importance of this grain not only in food but also in the biofuel industry (KAUR *et al.*, 2025). In Brazil, although ethanol production has historically been associated with sugarcane, corn-based ethanol has gained prominence in recent years, driven by the expansion of the second crop and more efficient technologies (GURGEL *et al.*, 2024; BOTHAST *et al.*, 2005).

Corn (*Zea mays* L.)

Corn belongs to the order Cyperales, the grass family Poaceae, and the genus *Zea*; its chemical composition, as well as the shapes of its kernels and plants, vary from species to species. The parts of the plant are primarily tassels, leaves, stems, roots, husks, and kernels. This plant reaches an average height of 2.5 m and bears yellow or white granular fruits at its upper end, known as tassels (PAIROCHTEERAKUL *et al.*, 2018).

The tassels play a key role in the proliferation and growth of the cornfield, as they are the plant's male flowers. Their emergence marks the beginning of the reproductive stage, and their quantity is an important factor for monitoring the growth of the 32 grasses (LU *et al.*, 2017; PAIROCHTEERAKUL *et al.*, 2018; ROUF SHAH; PRASAD; KUMAR, 2016).

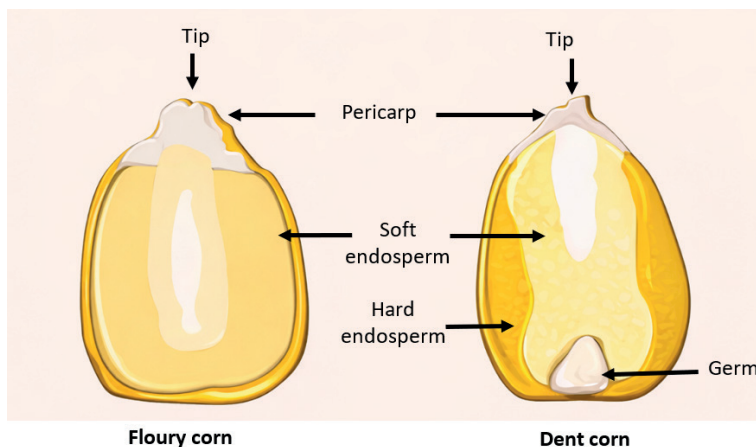
The ear consists of the cob, stigma, and corn kernels. The cob is composed of approximately 34% hemicellulose, 30% cellulose, 18.4% lignin, and 1.6% ash, from which glucans, xylan, arabinose, glycooligosaccharides, and others can be obtained. The stigma consists of silky filaments containing bioactive compounds, organic acids, alkaloids, polysaccharides, and other compounds, and can be used as medicines. In turn, corn kernels can be of the popcorn, flint, or hard type; flour or mealy; dent or dented; sweet, waxy, field, or purple; and come in various colors, such as red, orange, yellow, white, and purple (BAPTISTA *et al.*, 2013; BIBB *et al.*, 2018; CUNHA *et al.*, 2020; DÍAZ-GARCÍA *et al.*, 2021; GODOY *et al.*, 2021; GUO *et al.*, 2018; MORALES *et al.*, 2018; RAJKUMAR *et al.*, 2019; SUSILOWATI; LOTULUNG; MARYATI, 2018; TEIXEIRA *et al.*, 2021; TREHAN; SENHORINHO *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2019; WANG; ZHAO, 2019).

It is worth noting that the corn kernel consists of four regions, which are, from the inside out: (1) the embryo, characterized as the origin of the plant, that is, it initiates the development of a new grass; (2) endosperm, which is where the embryo's food is stored, such as starch, and comes in two types: soft endosperm, which has a crumbly texture and is lighter in color, and hard endosperm, which is stiffer and darker in color; (3) pericarp, characterized as the outer region of the grain, composed of 50% hemicellulose, 23% cellulose, 0.1% lignin, and 2.4% protein; and (4) tip of the corn kernel, a white, pointed part located at the

upper end of the grain (BENTO-SILVA; PATTO; DO ROSÁRIO BRONZE, 2018; CRUZ-VAZQUEZ *et al.*, 2019; PAIROCHTEERAKUL *et al.*, 2018).

Floury corn consists of 31.5% large embryo and 68.5% soft endosperm, while dent corn consists of 35.4% hard endosperm, 49.7% soft endosperm, and 15% embryo.

Figure 1 - Corn kernel structure.



Source: Adapted from CRUZ-VAZQUEZ *et al.*, 2019.

In turn, flint corn consists of 46.9% hard endosperm, 37.9% soft endosperm, and 15.2% embryo. The amylose content in these corn types ranges from 20.1% to 23.2% (CRUZ VAZQUEZ *et al.*, 2019).

It is worth noting that the chemical composition of corn depends on the grain's genetics and the environmental conditions to which it is subjected. Data from the literature show that common corn has, on average, a higher starch content than other components, such as protein and lipids. Phospholipids, free fatty acids, and sterols are present in the germ in proportions of 1–3%, 1.5%, and 1%, respectively (DOME *et al.*, 2020; VELJKOVIĆ *et al.*, 2018).

Corn is grown in more than 170 countries, with global production exceeding 1.1 billion tons, with the United States, China, and Brazil being the leading producers (KAUR *et al.*, 2025). In addition to its importance in human and animal nutrition, it offers great industrial versatility, being used in thousands of products, including biofuels (KAUR *et al.*, 2025). Globally, about 61% of production

is used for animal feed, 17% for human consumption, and approximately 22% for industrial uses, including ethanol production (KAUR *et al.*, 2025).

Corn planting is one of the most critical stages for crop success, as it determines fundamental aspects such as plant spacing, seeding density, and the proper distribution of seeds in the soil. Careful planning at this stage is essential, as it lays the foundation for the crop's development throughout its entire cycle, which generally ranges from 120 to 130 days (EMBRAPA, 2015; CHIODI, 2006; ALVES, 2015).

In the Brazilian context, corn cultivation occurs in two distinct seasons: the main crop, also known as the first crop, which takes place predominantly during the summer, and the off-season crop, or second crop, planted after the harvest of previous crops, such as soybeans. The main crop generally benefits from better climatic conditions, while the off-season crop, despite its growing economic importance, is more prone to production risks, especially due to irregular rainfall and limitations in temperature and solar radiation toward the end of the cycle (MAGALHÃES *et al.*, 1994; LOPES *et al.*, 2004; EMBRAPA, 2015).

Several factors directly influence crop establishment and development, notably climatic conditions such as temperature, water availability, and solar radiation. Maize germination and early growth are favored by soil temperatures between 25 °C and 30 °C, and values outside this range can compromise crop establishment. Water availability, in turn, is crucial, especially during the flowering and grain-filling stages, in which water deficit can lead to significant reductions in productivity (EMBRAPA, 2015; ALVES, 2015; LOPES *et al.*, 2004).

The appropriate choice of sowing time is also a determining factor, as it should allow the crop's most sensitive phenological stages to coincide with favorable environmental conditions, minimizing losses and reducing the incidence of pests and diseases. Furthermore, soil characteristics, such as texture and water-holding capacity, influence planting depth and early plant development, while the use of appropriate technologies, including machinery and high-quality seeds, contributes to a more uniform and efficient crop establishment (EMBRAPA, 2015; MAGALHÃES *et al.*, 1994; ALVES, 2015; LOPES *et al.*, 2004).

Thus, corn cultivation depends on the interaction between edaphoclimatic factors and management practices, with planting planning being a key element for achieving high levels of productivity in both the main and off-season crops.

Homopolysaccharide Starch

Starch is the primary storage polysaccharide found in plants and is widely distributed in structures such as leaves, flowers, fruits, and seeds, as well as in various types of stems and roots. It plays an essential role as a source of carbon and energy for plant metabolism, consisting mainly of two polymers: amylose and amylopectin (SMITH, 2001).

Amylose has a predominantly linear structure, while amylopectin has a highly branched organization. Structurally, amylopectin is composed of chains of glucose units linked by $\alpha(1\rightarrow4)$ glycosidic bonds, with branching occurring via $\alpha(1\rightarrow6)$ bonds distributed along the molecule at regular intervals. This fraction generally accounts for about 70 to 85% of the starch.

In turn, amylose consists predominantly of linear chains of glucose linked by $\alpha(1\rightarrow4)$ bonds, representing approximately 15 to 30% of the total starch composition. These structural characteristics impact the yield of starch conversion to glucose and, consequently, ethanol production (DURRANI; DONALD, 1995).

The amylose and amylopectin chains are organized within the starch granules, forming a semicrystalline structure responsible for various physico-chemical properties, such as gelatinization, retrogradation, and viscous behavior. The granular organization is decisive for these properties, since the granules vary in size, shape, and degree of crystallinity depending on their botanical origin (FERREIRA *et al.*, 2022).

From a structural standpoint, starch can be classified into distinct crystalline patterns, with types A, B, and C being the most common, typically identified by X-ray diffraction. Type A, typical of cereals such as corn, has a more compact arrangement; type B, common in tubers, has a more open structure; while type C corresponds to a combination of the two previous forms. These structural variations directly impact characteristics such as water absorption capacity, solubility, gelatinization, and rheological behavior (HOOVER, 2001).

When heated in the presence of water, starch undergoes gelatinization, a process in which the crystalline regions become disorganized, allowing water to enter and the granules to expand. As a result, more viscous systems are formed, a key aspect for various industrial applications, especially in the food sector. After cooling, retrogradation may occur, a process in which there is a partial reorganization of the amylose and amylopectin chains, influencing properties such as the texture and stability of the final products (ATWELL *et al.*, 1988; SINGH *et al.*, 2003).

The characteristics of starch vary according to its botanical origin, directly influencing its industrial applicability. In this context, corn starch stands out as one of the most widely used sources due to its wide availability, low cost, and favorable technological properties, such as thermal stability and gel-forming capacity. Furthermore, variations in the composition of amylose and amylopectin in different types of corn, such as waxy corn and high-amylose corn, result in distinct behaviors, expanding its applications in sectors such as food, biofuels, and biodegradable materials (HOOVER, 2001).

Therefore, this polysaccharide plays a highly significant role in the food industry, not only for its energy value but also for the various technological functions it offers.

Bioethanol production process from corn

The growing demand for renewable energy sources has driven the development of biofuels on a global scale, particularly bioethanol. This trend is linked to dwindling fossil fuel reserves, climate change, and the need to diversify the global energy mix (KAUR *et al.*, 2025). In this context, corn (*Zea mays* L.) stands out as one of the primary feedstocks for ethanol production, due to its high starch content and widespread availability.

Ethanol production from corn is predominant in the United States, where public policies such as the Renewable Fuel Standard (RFS) have driven the sector's expansion since the 2000s (KAUR *et al.*, 2025; USDA, 2023). Currently, global bioethanol production is dominated by first-generation feedstocks, accounting for over 99% of total supply (KAUR *et al.*, 2025). In this context, corn stands out

as the primary feedstock in developed countries due to established production and processing infrastructure.

However, the expansion of corn use for bioenergy raises important debates. Among the main challenges are competition between food and fuel, rising agricultural prices, and environmental impacts associated with intensive input use and land-use changes (ANTAR *et al.*, 2021). On the other hand, studies indicate that ethanol can contribute significantly to reducing greenhouse gas emissions, especially when integrated into sustainable production systems (MEKONNEN *et al.*, 2018).

Thus, corn-based ethanol production is embedded in a complex global context involving economic, environmental, and social aspects and is considered a strategic alternative in the energy transition.

The production of bioethanol from corn involves a sequence of physico-chemical and biological steps aimed at converting starch into ethanol. Initially, the corn is ground, usually by dry milling, to reduce particle size and increase the surface area for subsequent steps (BOTHAST; SCHLICHER, 2005).

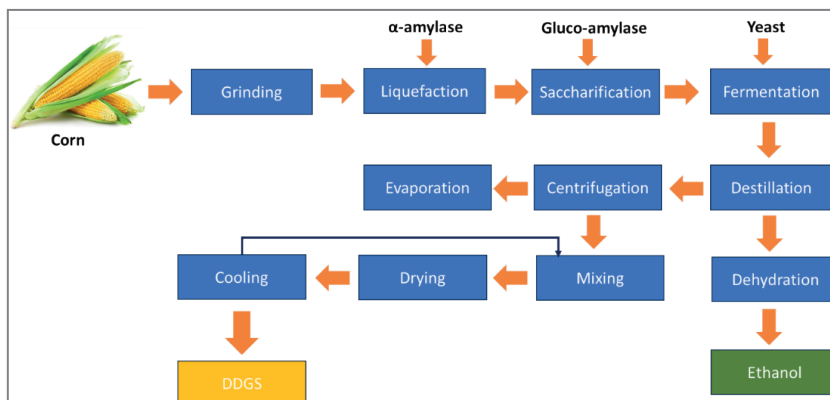
In the liquefaction stage, the ground material is heated in the presence of α -amylase enzymes, promoting the partial breakdown of starch and the formation of dextrans. Next, saccharification occurs, in which the dextrans are converted into glucose by the action of enzymes such as glucoamylase, making fermentable sugars available to the fermenting microorganisms (ZABED *et al.*, 2017).

The fermentation stage is carried out primarily by yeasts of the genus *Saccharomyces*, which convert glucose into ethanol and carbon dioxide. This process occurs under controlled conditions, aiming to maximize productivity and ethanol yield (BALAT; BALAT; ÖZ, 2008).

After fermentation, the resulting product is sent for distillation, where the ethanol is separated and concentrated. Depending on the application, an additional dehydration step may be necessary to obtain anhydrous ethanol. In addition, the process generates important co-products, such as distillers dried grains with solubles (DDGS), which have commercial value, especially in animal feed (BOTHAST; SCHLICHER, 2005). The stages of the corn ethanol production process can be seen in Figure 2.

Thus, the process of producing bioethanol from corn is characterized by an integration of steps that combine chemical and biological transformations, the efficiency of which is directly related to the control of operating conditions and the quality of the inputs used.

Figure 2 - Flowchart of corn ethanol production.



Source: Author's own work.

Biotechnological Advances

Biotechnological advances have played a key role in optimizing bioethanol production from corn, contributing to increased process efficiency, reduced costs, and improved yields. These innovations focus primarily on the development of more efficient enzymes, the genetic modification of microorganisms, and the implementation of integrated processes.

One of the main advances involves the improvement of α -amylases and glucoamylases, used in the liquefaction and saccharification stages. New generations of enzymes exhibit greater thermal stability and greater resistance to pH variations, allowing their application under more severe industrial conditions. As a result, there is a reduction in processing time and an increase in the conversion of starch into fermentable sugars (ZABED *et al.*, 2017).

Another highlight is the application of genetic engineering to microorganisms, especially yeasts of the genus *Saccharomyces*. Genetically modified strains have been developed to exhibit greater tolerance to high ethanol concentrations,

greater resistance to inhibitors, and greater fermentation capacity. These characteristics enable higher productivity and efficiency in the conversion of glucose to ethanol, reducing losses during the process (BALAT; BALAT; ÖZ, 2008).

In addition, integrated processes, such as simultaneous saccharification and fermentation, have been extensively studied and applied. In this model, the conversion of starch to glucose and fermentation occur in the same reactor, which reduces the number of s

steps, lowers the risk of contamination, and improves the overall efficiency of the process. This integration represents a significant advance over conventional processes, in which the steps occur separately (ZABED *et al.*, 2017).

Another promising field involves continuous fermentation, which allows for higher productivity compared to batch systems. This type of process maintains stable operating conditions, resulting in greater efficiency and reduced downtime, although it still faces challenges related to microbiological control and system stability.

Additionally, the development of second-generation (2G) ethanol stands out, which utilizes lignocellulosic residues from corn, such as straw and cobs. The application of biotechnology in this context involves the use of specific enzymes for the hydrolysis of cellulose and hemicellulose, allowing for the full utilization of the biomass. Despite its great potential, this process still presents challenges related to the cost of enzymes and the complexity of pretreatment (SUN; CHENG, 2002).

Thus, biotechnological advances have been transforming bioethanol production from corn, making it more efficient, sustainable, and economically viable. The continuation of these developments is essential to establish bioethanol as a competitive alternative to fossil fuels.

Corn-based ethanol production in Brazil

In Brazil, ethanol production has historically been based on sugarcane. However, in recent years, corn-based ethanol has shown significant growth, especially in the Midwest region, driven by the expansion of the second crop (safrinha) and the availability of raw materials (GURGEL *et al.*, 2024).

The adoption of corn as a source for ethanol production in Brazil is directly related to the intensification of agricultural production systems, particularly soybean-corn integration, which allows for efficient land use throughout the year (GURGEL *et al.*, 2024). This model enables the simultaneous production of food and energy, increasing the efficiency of the agricultural system and contributing to regional development.

Recent studies have shown that second-crop corn ethanol can generate significant positive impacts, including increased agricultural income, job creation, renewable energy production, and reduced greenhouse gas emissions (GURGEL *et al.*, 2024). In addition, the production of co-products such as distillers' dried grains contributes to animal feed, adding value to the production chain.

The consolidation of the sector in Brazil is also linked to public policies aimed at expanding biofuels, such as RenovaBio, which sets decarbonization targets and encourages sustainable energy production (IEA, 2023). These policies play a key role in attracting investment and expanding industrial capacity.

From a technological standpoint, Brazil has adopted processes similar to those used internationally, notably dry milling and the use of advanced fermentation and bioprocessing technologies. Furthermore, recent advances include the application of digital technologies and optimization systems to increase production efficiency (KAUR *et al.*, 2025).

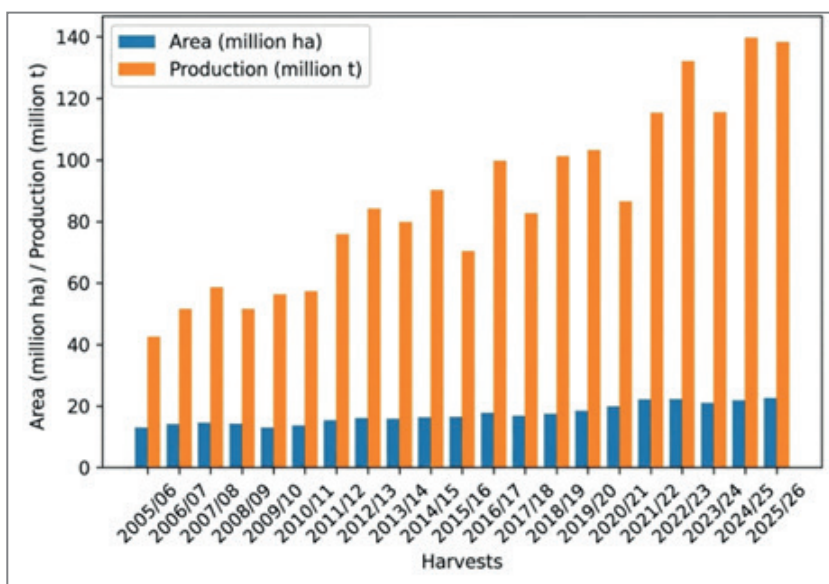
Another relevant aspect is the system's sustainability. The Brazilian model for corn ethanol production, based on crop-livestock integration and the use of residues, has the potential to reduce environmental impacts and increase the efficiency of natural resource use (GURGEL *et al.*, 2024). However, challenges related to logistics, infrastructure, and competitiveness still need to be overcome.

Thus, Brazil stands out as one of the leading countries with potential for corn ethanol expansion due to agricultural advantages, land availability, and favorable public policies. In the current scenario, it is the world's third-largest producer, with production growth of approximately 40%. Figure 3 shows the evolution of this Brazilian production in recent years.

Thus, the expansion of corn ethanol production in Brazil reinforces its strategic role in the transition to a more sustainable and diversified energy mix. The use of corn as a feedstock for biofuels aligns with global trends toward

replacing fossil fuels, contributing to energy security, economic development, and the mitigation of environmental impacts. However, the consolidation of this sector depends on overcoming limitations throughout the production chain, including technological, economic, and challenges related to the optimization of production processes. Thus, continuous progress in innovation, efficiency, and public policies will be fundamental to enhancing the competitiveness and sustainability of corn-based ethanol in the national and international context (KAUR *et al.*, 2025).

Figure 3 - Trends in corn acreage and production.



Fonte: Adaptado de INEA e CONAB (2025).

Sustainability

The production of bioethanol from corn stands out as a sustainable energy alternative, especially in the context of the transition to energy mixes that are less dependent on fossil fuels. Its main environmental benefit is linked to the reduction of greenhouse gas emissions, since the carbon dioxide (CO₂) released during ethanol combustion is partially offset by the CO₂ absorbed by plants throughout their growth cycle, resulting in a more favorable carbon balance compared to gasoline (MEKONNEN *et al.*, 2018).

Another positive aspect relates to the energy balance of the process. Studies have indicated that corn ethanol production exhibits a positive net energy balance, meaning the amount of energy generated by the fuel exceeds the energy consumed in its production. This result has been progressively improved through technological advancements, including improvements in agricultural efficiency, input use, and the optimization of industrial processes (IEA, 2023).

The sustainability of corn bioethanol is also reinforced by the utilization of co-products generated during the production process. Dried distillers grains with solubles (DDGS), for example, are widely used in animal feed, contributing to the full utilization of biomass and reducing waste. This integration between energy production and the food chain increases the system's overall efficiency and adds economic value (KAUR *et al.*, 2025).

In the agricultural context, corn production for ethanol can be integrated into already established production systems, such as crop rotation and the use of second crops. In Brazil, this integration allows for more efficient land use without the need for significant expansion of agricultural areas, which contributes to the preservation of natural ecosystems and the reduction of environmental impacts associated with land-use change (GURGEL *et al.*, 2024).

Furthermore, advances in second-generation ethanol produced from residues such as corn stover and cobs further expand the sustainable potential of this biofuel. This technology enables the utilization of agricultural byproducts, reducing waste generation and increasing the efficiency of biomass use, without directly competing with food production.

Another relevant point is bioethanol's contribution to the diversification of the energy mix and to energy security, reducing dependence on fossil fuels and promoting the use of renewable sources. This aspect is particularly important in a global context of seeking cleaner and more sustainable energy solutions.

Thus, bioethanol production from corn offers various environmental, energy, and economic benefits, establishing itself as a sustainable and strategic alternative. The continued incorporation of technological innovations and efficient agricultural practices tends to further expand these benefits, strengthening bioethanol's role in the global energy transition. The outlook is for the sector to grow even further in Brazil in the coming years, particularly in the Midwest,

where corn is abundant and there is demand for distillers' grains for animal feed. The segment is relatively new in the country; however, the significant growth observed in recent years demonstrates that corn ethanol is a viable alternative for Brazil's sugar-energy sector.

Acknowledgments

The authors thank Federal University of Jequitinhonha and Mucury Valleys, to the Institute of Science and Technology (ICT), the Postgraduate Program in Biocombustible, to the Laboratory of Mycology, Enzymology and Product Development (LMEDP) for institutional support. Thanks also to and to the funding agencies CNPq and FAPEMIG and to the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES) – Funding Code 001 for the support in the development of this work.

REFERÊNCIAS

- ADEKOYA, A. N. *et al.* Utilization of local corn (*Zea mays*) wastes for bioethanol production. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2024.
- AGHAEI, S.; KARIMI ALAVIJEH, M.; SHAFIEI, M. *et al.* A comprehensive review on bioethanol production from corn stover: worldwide potential, environmental importance, and perspectives. *Biomass and Bioenergy*, v. 161, 2022.
- ALVES, L. R. A.; BARROS, G. S. de C. Referenciais do mercado e formação do preço do milho no Brasil. *Visão Agrícola*, n. 13, p. 162–165, 2015. Disponível em: http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA_13_Comercializacao_insumos-artigo2.pdf. Acesso em: 8 abr. 2026.
- ANTAR, M.; LÉGERET, B.; BEYENE, G.; *et al.* The future of biofuels: challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 151, 2021.
- ATWELL, W. A. *et al.* The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World*, 1988.
- BALAT, M.; BALAT, H.; ÖZ, C. Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008.
- BAPTISTA, C. B. Imobilização de enzimas na parede celular de *Saccharomyces cerevisiae* para produção de etanol a partir de amido. 2013. 134 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Molecular) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: . Acesso em: 8 abr. 2026.
- BENTO-SILVA, A; *et al.* Relevance, structure and analysis of ferulic acid in maize cell walls. *Food Chemistry*, v. 246, p. 360-378, 2018.

BIBB, J. L.; O'BRIEN, M.; *et al.* Corn stover composition and its impact on biofuel production. *BioEnergy Research*, 2018.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (Org.). Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, ed. 1, 316 p., 2008. Disponível em: . Acesso em: 21 mar. 2026.

BOTHAST, R. J.; SCHLICHER, M. A. Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005.

BOTHAST, R. J.; SCHLICHER, M. A. Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 67, p. 19–25, 2005.

CHEN, X. *et al.* Bioethanol from corn stover – global warming footprint of alternative biotechnologies. *Applied Energy*, v. 247, p. 237–253, 2019.

CHIODI, L. *Integração espacial no mercado brasileiro de milho*. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2026.

CRUZ-VÁZQUEZ, C.; RÍOS-GONZÁLEZ, K.; TORRES-CHÁVEZ, P.; *et al.* Physicochemical, structural, and thermal characterization of starch from different maize varieties. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 135, p. 549–557, 2019.

CUNHA, D. A.; *et al.* Caracterização físico-química do milho e seus subprodutos. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 2020.

DÍAZ-GARCÍA, L.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A.; *et al.* Nutritional and nutraceutical properties of maize and its by-products. *Food Chemistry*, 2021.

DOMÉ, K.; PODGORBUNSKIKH, E.; BYCHKOV, A.; LOMOVSKY, O. Changes in the crystallinity degree of starch having different types of crystal structure after mechanical pretreatment. *Polymers*, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 641, 2020.

DURRANI, C. M., & DONALD, A.M. Caracterização física de géis de amilopectina. *Polymer Gels and Networks*, 3(1), 1-27. [http:// dx.doi.org/10.1016/0966-7822\(94\)00005-R](http://dx.doi.org/10.1016/0966-7822(94)00005-R). 1995.

EMBRAPA. Cultivo do milho. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. (Sistema de Produção, 1). ISSN 1679-012X. Disponível em: <https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/publicacoes>. Acesso em: 8 abr. 2026.

FERREIRA, P. S.; ALMEIDA, E. L. Amido–Uma abordagem acerca da composição, estrutura, propriedades, modificação e aplicação. *In: Congresso Brasileiro de Produção Animal e Vegetal*, Rio de Janeiro. 2022.

GODOY, R. L. O.; *et al.* Composição química e propriedades nutricionais do milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 2021.

GUO, J.; LIU, T.; HAN, L. Bioactive compounds and pharmacological functions of corn silk. *Food Chemistry*, 2018.

GURGEL, A. C.; SEABRA, J. E. A.; ARANTES, S. M. *et al.* Contribution of double-cropped maize ethanol in Brazil to sustainable development. *Nature Sustainability*, v. 7, p. 1429–1440, 2024.

HOOVER, R. Composição, estrutura molecular e propriedades físico-químicas de amidos de tubérculos e raízes: uma revisão. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253-267. 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00260-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00260-5).

IMEA – Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. Relatórios de acompanhamento de safra de milho. Cuiabá: IMEA, [ano]. Disponível em: <https://www.imea.com.br>. Acesso em: 10 abr. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 8 abr. 2026.

KAUR, G.; KAUR, H.; DEVI, V.; KAUR, A.; CHAUDHARY, D. P. Investigating maize as a sustainable energy crop for bioethanol production. *Biomass and Bioenergy*, v. 198, 2025.

LOPES, A.S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 115p.

LU, H.; CAO, Z.; XIAO, Y.; ZHUANG, B.; SHEN, C. TasselNet: counting maize tassels in the wild via local counts regression network. *Plant Methods*, v. 13, p. 79, 2017.

MAGALHÃES, P. C.; RESENDE, M.; OLIVEIRA, A. C. de; DURÃES, F. O. M.; SANS, L. M. A. Caracterização morfológica de milho de diferentes ciclos. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 20., 1994, Goiânia. *Centro-Oeste: cinturão do milho e do sorgo no Brasil: resumos*. Goiânia: ABMS, 1994. p. 1.

MEKONNEN, M. M.; GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y. The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science & Technology*, v. 52, n. 11, p. 6623–6631, 2018.

MORALES, M.; *et al.* Maize as a versatile crop for food and industrial applications. *Industrial Crops and Products*, 2018.

PAIROCHTEERAKUL, P. *et al.* Seed germination in relation to total sugar and starch in endosperm mutant of sweet corn genotypes. *Agronomy*, v. 8, n. 12, p. 299, 2018.

RAJKUMAR, P.; WANG, N.; RAVINDRAN, V. Maize kernel structure and composition. *Journal of Cereal Science*, 2019.

ROUF SHAH, T.; PRASAD, K.; KUMAR, P. Maize—A potential source of human nutrition and health: A review. *Cogent Food & Agriculture*, v. 2, n. 1, 2016.

SINGH, N. *et al.* Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 2003.

SMITH, A. M. A biossíntese de grânulos de amido. *Biomacromolecules*, 2(2), 335-341. 2001.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, v. 83, n. 1, p. 1–11, 2002.

SUSILOWATI, S.; LOTULUNG, P. D. N.; MARYATI, T. Bioactive compounds and antioxidant activity of corn silk (*Zea mays* L.). *AIP Conference Proceedings*, v. 2026, 2018.

TEIXEIRA, W. G.; VICTORIA, D. C.; BARROS, A. H. C.; LUMBRERAS, J. F.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, F. A. M. LIMA, E. P.; BUENO FILHO, J. S. S.; MONTEIRO, J. E. B. A. Predição da água disponível no solo em função da granulometria para uso nas análises de risco no zoneamento agrícola de risco climático. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. (*Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 272)

TESTER, R. F.; KARKALAS, J.; QI, X. Starch—composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, 2004.

TREHAN, S.; SINGH, N.; KAUR, A. Characteristics of white, yellow, purple corn accessions: phenolic profile, textural, rheological properties and muffin making potential. *Journal of food science and technology*, [S. I], v. 55, n. 6, p. 2334-2343, 2018.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. U.S. biofuel production and policy outlook. Washington, D.C.: USDA, 2023. Disponível em: . Acesso em: 8 abr. 2026.

VELJKOVIĆ, V. B.; BANKOVIĆ-ILIĆ, I. B.; STAMENKOVIĆ, O. S. Biodiesel production from corn oil: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 531–548, 2018.

WANG, C.; ZHAO, Y. Corn silk (*Zea mays* L.) in traditional Chinese medicine: A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 2019.

XU, F.; SUN, J.; SUN, R. Chemical composition and structural characterization of corn stover. *Industrial Crops and Products*, 2017.

YANG, Q.; ZHANG, L. Diversity in maize grain types and composition. *Food Research International*, 2019.

ZABED, H. *et al.* Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Julianno Pizzano Ayoub

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Engenheiro de Segurança do Trabalho pelo Centro Universitário Campo Real. Especialista em Engenharia da Qualidade. Especialista em Engenharia de Produção. Especialista em Engenharia de Suprimentos. Especialista em Engenharia Geotécnica. Especialista em Meio Ambiente, Desenvolvimento e Sustentabilidade. Especialista em Gestão Ambiental. Especialista em Direito Ambiental. Especialista em Educação Ambiental. Especialista em Docência no Ensino Superior. Especialista em Gestão de Produção Industrial. Especialista em Engenharia Química. Mestre em Bioenergia pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Escritor e membro de conselho editorial. Tem experiência com gestão de pessoas, redução de custos, adequações às NRs, aplicação de ferramentas de Qualidade, certificações, auditorias, perícias e treinamentos. Possui também experiência em laboratório, análise, desenvolvimento de produtos e processos de isolantes termoacústicos minerais, inclusive atuando como Gerente de uma Fábrica de lã de Rocha. Desde 2023 atua como Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho na Atlas Engenharia Ambiental. Consultor na Dgemar Assessoria Industrial.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3534582408466846>

Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira

Possui Graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Possui Graduação interrompida em Engenharia Civil pela Faculdade Campo-Real. Possui Especialização em Estruturas de Concreto e Fundações pela Universidade Paranaense. Tem experiência no ramo de construção civil como proprietário de empresa e consultor. Atuou com elaboração e implantação de gestão ambiental, como PGRCC, técnicas e matéria prima sustentável. Ministrou palestras e cursos nas áreas de engenharia ambiental, civil, segurança, gestão empresarial e marketing. Pesquisador da engenharia, escritor e proprietário da Atlas. Atualmente atua na área comercial da Gesla Isolamentos Termoacústicos.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9482779378958000>

Fabricio Hernandes de Freitas

Doutorando em Bioenergia pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Geógrafo formado pela Universidade Estadual de Maringá (UEM, 2009), especialista em

SOBRE OS ORGANIZADORES

Gestão Ambiental pelo Centro Universitário Metropolitano de Maringá (2010, UNIFAMMA), Mestre em Bioenergia (Área de Biocombustíveis, Departamento de Engenharia Química, UEM, 2020). Perito Judicial Ambiental cadastrado no Projudi - PROCESSO ELETRÔNICO DO JUDICIÁRIO DO PARANÁ E JUSTIÇA FEDERAL. Conhecimento técnico em Gestão e reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos, gestão urbana, acessibilidade, conforto térmico de ruas e avenidas, planejamento e estruturação de calçadas.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9901799429644416>

ÍNDICE REMISSIVO

A

Adsorption: 58, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73

Alcalino: 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33

Análise Bibliométrica: 9, 12, 18, 19, 20

Auto-Hidrólise: 22, 23, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 33

B

Biodiesel: 26, 34, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 95, 96, 98, 100, 120

bio-Kerosene: 75, 77, 79, 92, 94, 95, 97, 98, 99, 100

Biomassa Lignocelulósica: 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 33

Bioprocess: 104

D

Digestão Anaeróbia: 9, 10

E

Energy Efficiency: 78, 97, 104

Ethanol: 34, 35, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 100, 101, 102, 104, 105, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119

G

Genes de Resistência a Antibióticos: 9

I

Industrial Processes: 84, 104, 116

Innovation: 77, 104, 115

P

Planos de Resíduos: 38

Polluents: 58

Pré-Tratamento: 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33

R

Rede de Colaboração: 9

Renewable Fuels: 75

Resíduos de Construção Civil: 38, 39, 40, 43, 52, 54, 55

S

Sustentabilidade: 33, 38, 40, 52

W

Water: 29, 34, 35, 58, 59, 60, 65, 72, 73, 85, 86, 96, 97, 102, 108, 109, 110, 119



científica digital



VENDA PROIBIDA - ACESSO LIVRE - OPEN ACCESS

