

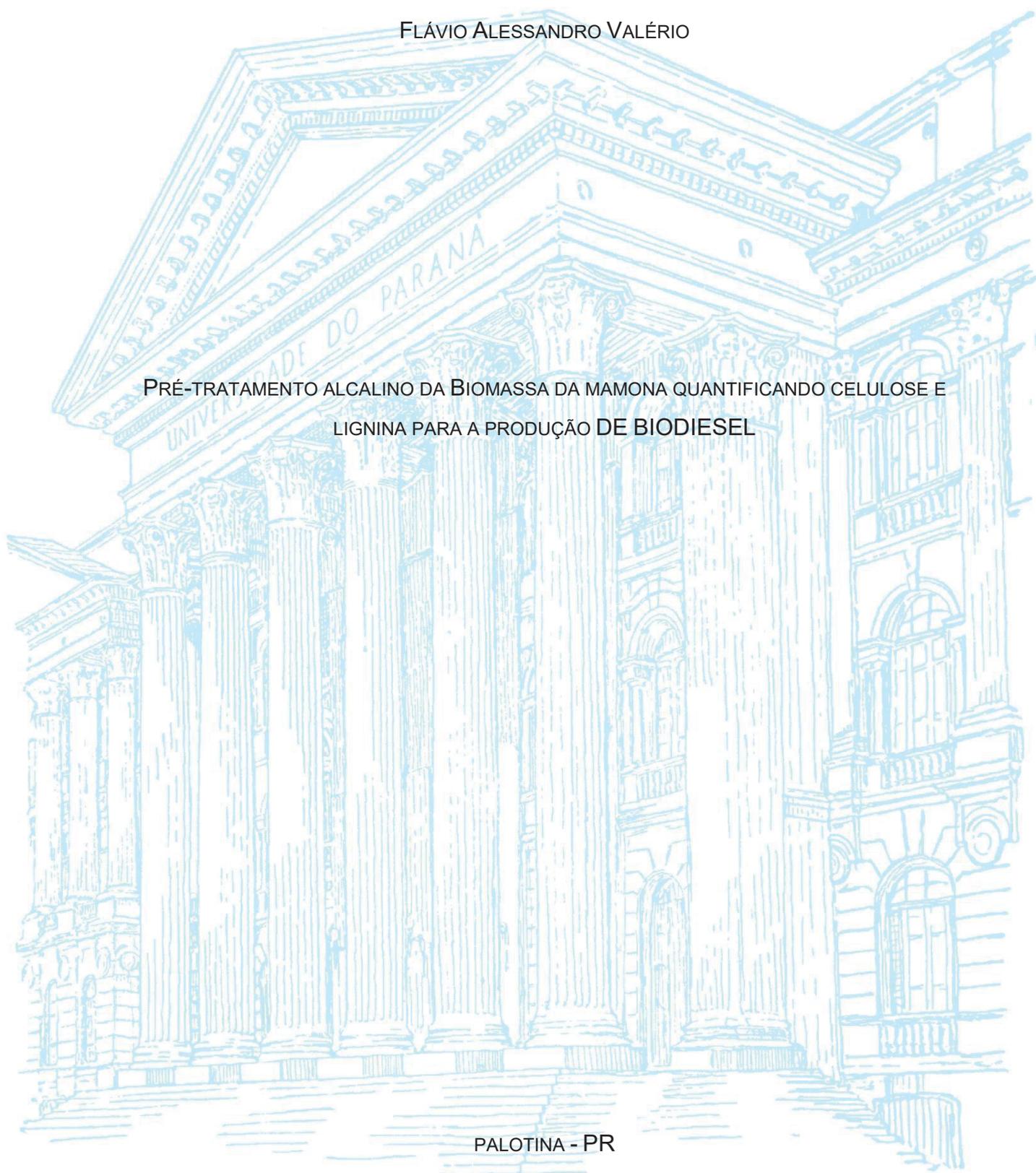
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FLÁVIO ALESSANDRO VALÉRIO

PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO DA BIOMASSA DA MAMONA QUANTIFICANDO CELULOSE E
LIGNINA PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

PALOTINA - PR

2025



FLÁVIO ALESSANDRO VALÉRIO

PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO DA BIOMASSA DA MAMONA QUANTIFICANDO CELULOSE E
LIGNINA PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Tese de Doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan Dieter

Coorientador: Prof. Dr. Emmanuel Zullo Godinho

PALOTINA - PR

2025

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

V164 Valério, Flávio Alessandro

Pré-tratamento alcalino da biomassa da mamona
quantificando celulose e lignina para a produção de biodiesel
/ Flávio Alessandro Valério. – Palotina, PR, 2025

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan Dieter.

Coorientador: Prof. Dr. Emmanuel Zullo Godinho.

1. Celulose. 2. Lignina. 3. Mamona. I. Dieter, Jonathan..
II. Godinho, Emmanuel Zullo. III. Universidade Federal
do Paraná. IV. Título.

CDU 62

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653

TERMO DE APROVAÇÃO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL - 40001016173P5

ATA Nº19

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DOUTORADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

No dia trinta de maio de dois mil e vinte e cinco às 09:00 horas, na sala Virtual, On-line, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de tese do doutorando **FLÁVIO ALESSANDRO VALÉRIO**, intitulada: **Pré-tratamento alcalino da Biomassa da mamona quantificando celulose e lignina para a produção BIODIESEL**, sob orientação do Prof. Dr. **JONATHAN DIETER**. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: **JONATHAN DIETER** (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), **FRANCIELLY TORRES DOS SANTOS** (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), **ELISANDRO PIRES FRIGO** (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), **FERNANDO DE LIMA CANEPPELE** (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - PIRASSUNUNGA), **RICARDO MARQUES BARREIROS** (UNESP). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela **APROVAÇÃO**. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de doutor está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, **JONATHAN DIETER**, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

Palotina, 30 de Maio de 2025.

Assinatura Eletrônica
06/06/2025 08:31:27.0
JONATHAN DIETER
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
06/06/2025 08:42:39.0
FRANCIELLY TORRES DOS SANTOS
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
09/06/2025 10:59:34.0
ELISANDRO PIRES FRIGO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
31/05/2025 08:55:13.0
FERNANDO DE LIMA CANEPPELE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - PIRASSUNUNGA)

Assinatura Eletrônica
02/06/2025 11:50:10.0
RICARDO MARQUES BARREIROS
Avaliador Externo (UNESP)

Assinatura Eletrônica
09/06/2025 20:33:09.0
EMMANUEL ZULLO GODINHO
Coorientador(a) (CENTRO UNIVERSITARIO SAGRADO CORACAO)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL - 40001016173P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **FLÁVIO ALESSANDRO VALÉRIO**, intitulada: **Pré-tratamento alcalino da Biomassa da mamona quantificando celulose e lignina para a produção BIODIESEL**, sob orientação do Prof. Dr. **JONATHAN DIETER**, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 30 de Maio de 2025.

Assinatura Eletrônica
06/06/2025 08:31:27.0
JONATHAN DIETER
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
06/06/2025 08:42:39.0
FRANCIELLY TORRES DOS SANTOS
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
09/06/2025 10:59:34.0
ELISANDRO PIRES FRIGO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
31/05/2025 06:55:13.0
FERNANDO DE LIMA CANEPELE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO -
PIRASSUNJUNGA)

Assinatura Eletrônica
02/06/2025 11:50:10.0
RICARDO MARQUES BARREIROS
Avaliador Externo (UNESP)

Assinatura Eletrônica
09/06/2025 20:33:09.0
EMMANUEL ZULLO GODINHO
Coordenador(a) (CENTRO UNIVERSITARIO SAGRADO CORACAO)

Dedico a tese de doutorado a Universidade Federal do Paraná - UFPR. Por todo apoio, estrutura e portas que me foram abertas. Estudar nessa instituição foi uma experiência completa, desde o período de mestrado até o doutorado, desde a sala de aula e a convivência com os colegas com quem dividi tantos aprendizados até o desenvolvimento dessa tese. Jamais serei capaz de demonstrar minha gratidão por tudo que fizeram por mim. Minha tese só se conclui hoje por todas as oportunidades que me foram dadas.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e por ele ter colocado pessoas especiais em minha vida que me ajudou muito durante o período do curso

À minha família, em especial, meu pai Mauricio Antonio Valério, minha mãe Aurea Santina Marcato Valério, minha querida e amada esposa Camila de Castro Valério e minha filha amada Ana Flávia de Castro Valério, por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões. Ao meu irmão Fernando Claudio Valério pelo companheirismo no dia a dia. À minha amiga e companheira de experimento Meirieli Nunes Beladeli ao meu amigo Reginaldo Gonçalves Barbosa por ajudar a conduzir o experimento em minha ausência junto aos alunos do colégio agrícola.

Aos Professores Dr. Jonathan Dieter e Dr. Emmanuel Zullo Godinho, pelas orientações e dedicação durante todo esse período e pelos ensinamentos durante a realização da pesquisa.

A todos os colegas do corpo discente do programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental.

Ao corpo docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental.

“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível.” (Max Weber).

RESUMO

O cultivo de plantas bioenergéticas tem sido incentivado como alternativa à substituição do petróleo, uma fonte de energia não renovável e principal responsável pela intensificação do efeito estufa em nível global. No Brasil, a produção de mamona concentra-se majoritariamente na região Nordeste, representando uma importante fonte de renda para a agricultura familiar. Essa cultura destaca-se por sua resistência à seca, o que contribui para a fixação da mão de obra nessas regiões, promovendo geração de emprego e fornecimento de matéria-prima essencial para o desenvolvimento regional e nacional. Diversos tipos de pré-tratamento vêm sendo utilizados com o objetivo de modificar ou remover a lignina, aumentar a área superficial e reduzir o grau de polimerização e cristalinidade da celulose, de forma a facilitar a digestão enzimática. Entre os agentes utilizados destacam-se a reação de Fenton (com sulfato ferroso heptahidratado – $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), o ácido sulfúrico (H_2SO_4), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o hidróxido de sódio (NaOH). O objetivo deste trabalho foi avaliar o pré-tratamento hidrotérmico alcalino utilizando o hidróxido de sódio (NaOH) na biomassa da mamona, com foco na quantificação dos teores finais de celulose e lignina. Para isso, foi elaborado um arranjo experimental que permitiu avaliar, por meio de Análise de Variância (ANOVA), os efeitos significativos da concentração de NaOH e da temperatura, bem como sua interação, sobre as concentrações finais de celulose e lignina. Os ensaios foram realizados em quadruplicata, possibilitando o cálculo da ANOVA e a comparação entre médias por meio de testes estatísticos. Ao todo, foram necessárias 36 amostras no planejamento experimental para análise das duas variáveis.

Palavras-chave: Celulose; Lignina; Pré-tratamento; Mamona; ANOVA

ABSTRACT

The cultivation of bioenergy crops has been encouraged as an alternative to replace petroleum, a non-renewable energy source and a major contributor to the intensification of the global greenhouse effect. In Brazil, castor bean (*Ricinus communis*) production is mainly concentrated in the Northeast region, representing an important source of income for family farming. This crop stands out for its drought resistance, which helps retain labor in these regions, promoting employment generation and supplying raw materials essential for both regional and national development. Various types of pretreatments have been employed with the aim of modifying or removing lignin, increasing surface area, and reducing the degree of polymerization and crystallinity of cellulose to facilitate enzymatic hydrolysis. Among the agents used are the Fenton reaction (with ferrous sulfate heptahydrate – $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), sulfuric acid (H_2SO_4), hydrogen peroxide (H_2O_2), and sodium hydroxide (NaOH). The objective of this study was to evaluate the alkaline hydrothermal pretreatment using sodium hydroxide (NaOH) on castor bean biomass, focusing on quantifying the final levels of cellulose and lignin. To achieve this, an experimental design was developed to assess, through Analysis of Variance (ANOVA), the significant effects of NaOH concentration and temperature, as well as their interaction, on the final concentrations of cellulose and lignin. The experiments were conducted in quadruplicate, allowing for ANOVA calculations and pairwise mean comparisons using statistical tests. A total of 36 samples were required in the experimental design to analyze both variables.

Keywords: Cellulose; Lignin; Pretreatment; Castor bean; ANOVA.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Nuvem de palavras	19
FIGURA 2 – Evolução da produtividade em kg/ha por Regiões (1976-2025)	21
FIGURA 3 – Evolução da produção em mil toneladas por Regiões (1976-2025)	22
FIGURA 4 – Parte aérea (a); Parte aérea da mamona e Fruto da Mamona (b); e sementes dos frutos da Mamona (c)	23
FIGURA 5 – Estrutura da parede celular das plantas (celulose, hemicelulose e lignina)	27
FIGURA 6 – Estrutura química da lignina	28
FIGURA 7 – Estrutura da celulose na célula vegetal	29
FIGURA 8 – Estrutura química da celulose	30
FIGURA 9 – Efeitos do pré-tratamento em resíduos lignocelulósicos	32
FIGURA 10 – Tipos de Energia de biomassa	37
FIGURA 11 – Fluxograma das metodologias experimentais para a caracterização química a partir de pré-tratamento de NaOH da mamona	41
FIGURA 12 – Gráficos de Histograma com curva de densidade para celulose e lignina <i>in natura</i> tratamentos (MIA e TAMAR)	48
FIGURA 13 – Gráficos de dispersão mostrando a relação entre os dados dos tratamentos (MIA e TAMAR)	49
FIGURA 14 – Gráfico de Boxplot comparando os resultados dos tratamentos MIA e TAMAR <i>in natura</i>	51
FIGURA 15 – Gráfico de Boxplot comparando os resultados dos tratamentos MIA e TAMAR <i>in natura</i>	51
FIGURA 16 – Gráfico de Boxplot comparando os resultados dos tratamentos MIA e TAMAR após o pré-tratamento	52
FIGURA 17 – Gráfico de Boxplot comparando os resultados dos tratamentos MIA e TAMAR após o pré-tratamento	52
FIGURA 18 – Evolução percentual da mistura diesel/biodiesel ao longo dos anos	57
FIGURA 19 – Gráficos das regressões lineares múltiplas	61
FIGURA 20 – Gráficos de Histograma com curva de densidade para biodiesel nas variedades (MIA e TAMAR) <i>in natura</i>	63
FIGURA 21 – Gráficos de dispersão mostrando a relação entre os dados das variedades (MIA e TAMAR) <i>in natura</i>	64
FIGURA 22 – Gráfico de Boxplot comparando os resultados das variedades (MIA e TAMAR) <i>in natura</i>	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Teor de celulose em diversas biomassas	31
TABELA 2 – Agrupamento e Organização dos dados encontrados	45
TABELA 3 – Agrupamento e Organização dos dados encontrados	47
TABELA 4 – Agrupamento e Organização dos dados encontrados	59

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
	JUSTIFICATIVA	17
	OBJETIVOS	17
	Objetivo geral	17
	Objetivos específicos	17
	CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA	19
1	IMPORTÂNCIA DO USO DA BIOMASSA NO MUNDO	20
2	MAMONA	23
3	CELULA VEGETAL	26
3.1	PAREDE CELULAR	26
3.2	LIGNINA	27
3.3	CELULOSE	28
3.4	PRÉ-TRATAMENTO	31
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA – REGRESSÃO	33
	CAPÍTULO 2 – QUANTIFICAÇÃO QUÍMICA DA BIOMASSA	37
1	INTRODUÇÃO	37
2	MATERIAL E MÉTODOS	41
2.1	BIOMASSA DA MAMONA	41
2.2	PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NAOH)	42
2.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	42
2.4	MÉTODOS ANALÍTICOS	42
2.4.1	Determinação do teor de celulose	42
2.4.2	Determinação do teor de lignina	42
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
	CAPÍTULO 3 – PRODUÇÃO DE BIODIESEL	56
1	INTRODUÇÃO	56
2	MATERIAL E MÉTODOS	58
2.1	ÍNDICE DE ACIDEZ DO BIODIESEL DE MAMONA	59
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	69

INTRODUÇÃO

O cultivo de plantas bioenergéticas está sendo estimulado para substituir o petróleo, uma fonte de energia não renovável que é a principal causadora do efeito estufa mundial. Contudo, há de se ter prudência, em razão de prováveis interferências na segurança alimentar mundial, por meio da redução e/ou transferência de áreas tradicionais de culturas alimentares para a bioenergia. No Brasil, a produção de mamona concentra-se na região Nordeste, sendo uma importante fonte de renda para a agricultura familiar. No entanto, as lavouras são frequentemente cultivadas em policultivos de sequeiro, sem parâmetros técnicos definidos e com práticas culturais inadequadas. A utilização de sementes impróprias para o plantio, devido à indisponibilidade de materiais melhorados, limita a produtividade.

Dentre os estados brasileiros, São Paulo se destaca com maior produtividade (1.580 kg/ha), embora represente apenas 0,88% da produção nacional de mamona, devido ao maior aporte tecnológico. A mamona apresenta resistência à seca, o que contribui para a fixação de mão-de-obra nessas regiões, gerando emprego e matéria-prima imprescindíveis para o desenvolvimento local e nacional. Segundo o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola da CONAB, o Brasil já foi o maior produtor e exportador mundial de óleo de mamona por décadas. Esse óleo tem ampla aplicação industrial, sendo utilizado na fabricação de cosméticos, componentes automotivos, polímeros, lubrificantes para motores de alta rotação, carburantes para motores a diesel e fluidos hidráulicos em aeronaves.

Contudo, para obter alta eficiência na produção de biodiesel, é necessário que a biomassa resultante da extração do óleo de mamona possua altas taxas de celulose e baixas porcentagens de lignina. Portanto, o pré-tratamento da biomassa é uma fase crucial do processo de produção de biodiesel. Este pré-tratamento pode ser químico, físico ou biológico, e visa remover a maior quantidade possível de lignina, aumentando a área superficial da celulose e facilitando a digestão enzimática. Dessa forma, a planta da mamona, com suas diversas utilidades econômicas, agrícolas e financeiras, torna-se ainda mais valiosa.

A aplicação da estatística nos cálculos de produção é de suma importância para otimizar processos e obter resultados mais precisos. A regressão estatística, em particular, é uma ferramenta poderosa para a análise de dados e identificação de correlações significativas entre diferentes variáveis. No contexto da produção de

biodiesel a partir da mamona, a regressão estatística pode ser utilizada para analisar a eficácia dos diferentes métodos de pré-tratamento, assim como para prever os resultados esperados com base nas condições experimentais. Isso permite ajustes finos no processo, garantindo maior eficiência e rentabilidade.

Além disso, a aplicação da regressão estatística pode ajudar a identificar os fatores que mais influenciam a produção de celulose e lignina na biomassa da mamona. Com esses dados, é possível tomar decisões informadas sobre quais práticas agrícolas e métodos de pré-tratamento são mais eficazes. Isso não só melhora a produtividade e a qualidade do biodiesel produzido, como também contribui para a sustentabilidade e competitividade da cultura da mamona no mercado global.

JUSTIFICATIVA

Este trabalho visa quantificar o impacto do pré-tratamento alcalino com NaOH na porcentagem de celulose e lignina da mamona em condições de campo, utilizando regressão estatística para validar e otimizar os resultados.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto do pré-tratamento alcalino com NaOH na biomassa da mamona, quantificando os teores finais alcançados de celulose, lignina e biodiesel.

Objetivo geral

Avaliar o impacto do pré-tratamento alcalino com NaOH na biomassa da mamona, quantificando os teores finais de celulose, lignina e biodiesel e aplicando análise de regressão estatística para otimização dos resultados.

Objetivos específicos

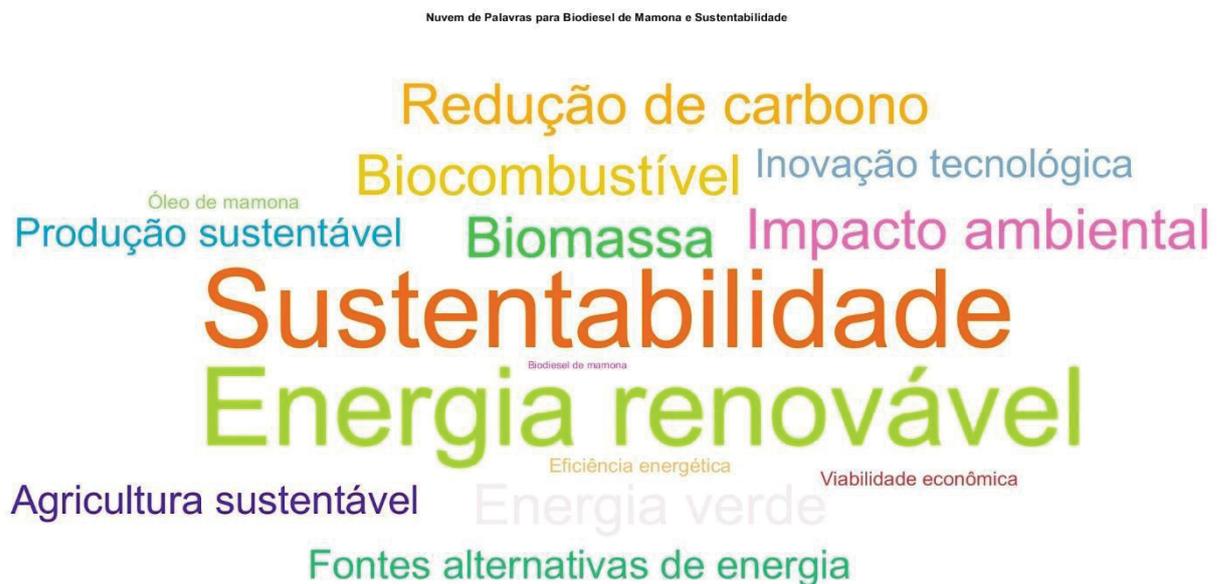
1. Quantificar a porcentagem de celulose presente na biomassa da mamona após o pré-tratamento alcalino com NaOH.
2. Determinar o teor de lignina na biomassa da mamona submetida ao pré-tratamento alcalino com NaOH.
3. Avaliar a produção de biodiesel a partir da biomassa da mamona após o pré-tratamento alcalino com NaOH.

4. Aplicar métodos de regressão estatística para analisar e otimizar os dados obtidos, buscando correlações significativas entre as variáveis estudadas.

CAPÍTULO 1 - REVISÃO DE LITERATURA

A Figura 1 apresenta uma nuvem de palavras que foi desenvolvida a partir das palavras-chave extraídas das literaturas revisadas. Esses termos foram selecionados com base em sua frequência e relevância nos artigos científicos analisados sobre a produção de biodiesel a partir da mamona. Esse método permitiu identificar os principais temas e tendências de pesquisa na área, fornecendo uma visão abrangente do campo de estudo.

FIGURA 1 - NUVEM DE PALAVRAS PARA BIODIESEL DE MAMONA E SUSTENTABILIDADE



FONTE: Autor (2024).

A nuvem de palavras-chave destaca os principais temas presentes na pesquisa científica sobre a produção de biodiesel a partir da mamona. Observa-se uma ênfase marcante na sustentabilidade, termo central e mais proeminente, indicando que a busca por práticas sustentáveis é um fator fundamental nesse campo. A preocupação com a redução de carbono e o uso de energia renovável também se evidenciam, refletindo a importância do biodiesel como uma alternativa mais limpa em relação aos combustíveis fósseis.

A mamona é identificada como uma matéria-prima essencial, com os termos "óleo de mamona" e "biodiesel de mamona" em destaque. A pesquisa aborda tanto os aspectos técnicos, como "inovação tecnológica" e "eficiência energética", quanto os impactos socioambientais, como "impacto ambiental" e "agricultura sustentável". A

menção à "viabilidade econômica" demonstra a preocupação em garantir que a produção de biodiesel a partir da mamona seja viável economicamente, enquanto o termo "fontes alternativas de energia" reforça a busca pela diversificação na matriz energética.

1. IMPORTÂNCIA DO USO DA BIOMASSA NO MUNDO

O ano de 2023 foi um marco na produção de biocombustíveis no Brasil, evidenciando o crescimento notável do setor e a diversificação das fontes de energia renováveis no país. Juntos, etanol e biodiesel atingiram a impressionante marca de quase 43 bilhões de litros produzidos, estabelecendo um recorde histórico. Esses dados foram destacados no Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024, divulgado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

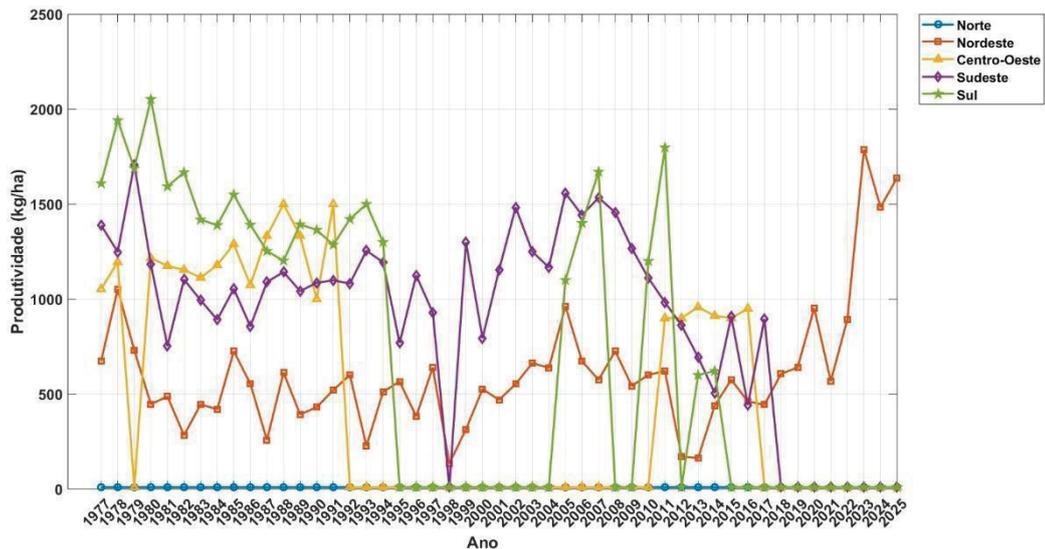
Os resultados consolidados reforçam a posição do Brasil como líder global na produção e uso de biocombustíveis. Isso tem contribuído significativamente para a matriz energética nacional e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Conforme salientou o ministro de Minas e Energia, Alexandre Silveira, esses avanços posicionam o Brasil na vanguarda da transição energética justa e inclusiva, promovendo o desenvolvimento econômico e beneficiando a população.

Um dos principais destaques do estudo é o etanol, que teve um aumento de 15,5%, alcançando 35,4 bilhões de litros produzidos. A produção de etanol anidro, que é misturado à gasolina, subiu 13,5% em comparação ao ano anterior, enquanto a produção de etanol hidratado, vendido separadamente, cresceu 16,8%. A região Sudeste se manteve na liderança da produção nacional, com 17,2 bilhões de litros, representando 48,5% da produção total no Brasil. A produção de biodiesel também foi expressiva, com mais de 7,5 bilhões de litros, impulsionada pelo aumento da mistura obrigatória no diesel para 12%, a partir de abril de 2023. A região Sul destacou-se com 3,1 bilhões de litros, seguida pelo Centro-Oeste com 3 bilhões. O biometano também teve um aumento significativo, com produção de 74,9 milhões de m³, representando um crescimento de 12,3% em relação ao ano anterior. (LACERDA et al., 2015).

No gráfico (Figura 2) intitulado "Evolução da produtividade em kg/ha por Regiões (1976-2025)", você pode visualizar a evolução da produtividade agrícola das

regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil ao longo dos anos (CONAB, 2023).

FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DA PRODUTIVIDADE EM KG/HA POR REGIÕES (1976-2025)



FONTE: Adaptado de CONAB, (2023).

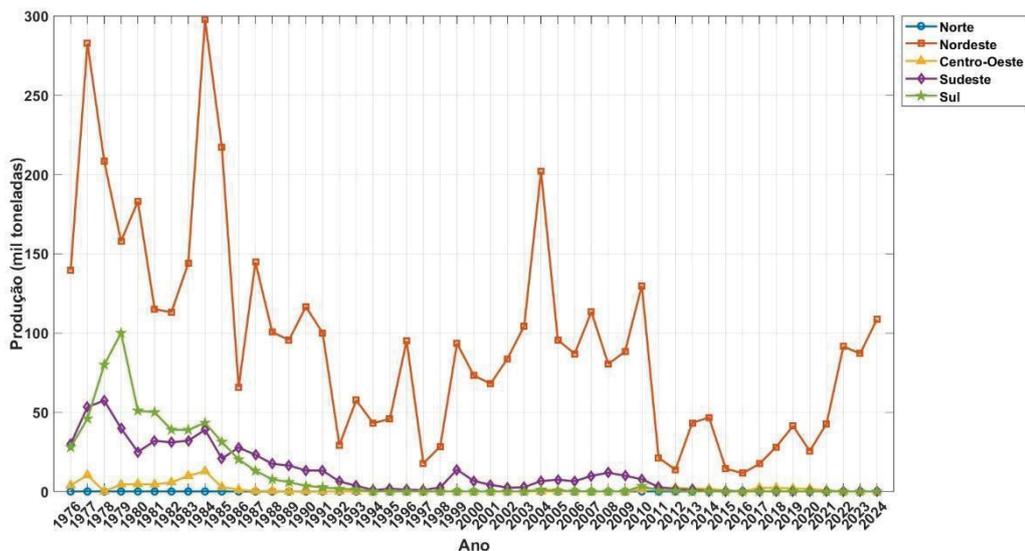
Começando pela região Norte, percebe-se uma produção constante de 10 kg/ha ao longo de todos os anos. Isso sugere uma estabilidade na produção ou uma possível falta de dados detalhados para essa região. Em contraste, a região Nordeste apresenta uma grande variação na produção, com picos notáveis em 1977/78 (1.052 kg/ha) e 2024/25 (1.600 kg/ha), mas também com anos de baixa produção, como 1997/98 (135 kg/ha). Essa flutuação pode ser atribuída a fatores climáticos, políticas agrícolas ou outros fatores socioeconômicos.

A região Centro-Oeste também apresenta variações significativas, mas com um padrão de dados curioso onde, após 1991/92, os valores constantes de 10 kg/ha predominam, possivelmente indicando uma ausência ou inconsistência nos dados. O Sudeste, por outro lado, mostra um crescimento mais consistente, com alguns anos de produção significativamente menor, como 1995/96 (10 kg/ha), mas em geral mantendo-se relativamente alta ao longo dos anos. Em particular, a produção aumentou consideravelmente em 1986/87 (1.300 kg/ha) e continuou flutuando com valores significativos até a previsão para 2024/25, que é notavelmente baixa em 10 unidades.

A região Sul, assim como o Sudeste, tem um histórico de produção mais estável, com altas como em 1979/80 (2.053 kg/ha) e 2015/16 (1.798 kg/ha), embora também tenha períodos de dados de 10 kg/ha a partir de 1994/95 até 2024, o que pode ser novamente uma ausência ou inconsistência nos dados. No geral, esses dados fornecem uma visão interessante das variações regionais na produção agrícola do Brasil ao longo dos anos e sugerem possíveis áreas de estudo mais aprofundado para entender as razões por trás dessas flutuações.

No gráfico (Figura 3) intitulado "Evolução da produção em mil toneladas por Regiões (1976-2025)", você pode visualizar a evolução da produção agrícola das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil ao longo dos anos (CONAB, 2023).

FIGURA 3 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO EM MIL TONELADAS POR REGIÕES (1976-2025)



FONTE: Adaptado de (CONAB, 2023).

Os dados apresentados demonstram a evolução da produção agrícola nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, no período de 1977 a 2025. A região Norte mantém uma produção estável de 10,0 mil toneladas ao longo dos anos. Em contraste, a região Nordeste mostra uma variabilidade significativa, com picos notáveis em 1978 (1.052,0 mil toneladas) e 2023 (1.787,0 mil toneladas), mas também períodos de baixa produção, como em 1982 (283,0 mil toneladas). A

oscilação pode ser atribuída a fatores climáticos, econômicos ou a políticas agrícolas específicas da região.

Por outro lado, as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul exibem padrões diferentes de variação. O Centro-Oeste, por exemplo, experimenta um crescimento até meados dos anos 1980, mas tem valores reduzidos ou constantes (10,0 mil toneladas) em anos subsequentes, sugerindo possíveis lacunas de dados ou um declínio na produção. A região Sudeste mostra um aumento constante com flutuações, enquanto a região Sul apresenta altos níveis de produção inicial, com um pico em 1980 (2.053,0 mil toneladas), seguido por variabilidade ao longo das décadas. No geral, esses dados evidenciam as diferentes dinâmicas de produção agrícola nas regiões brasileiras, refletindo suas particularidades econômicas, geográficas e climáticas.

2. MAMONA

A mamona (*Ricinus communis* L.) (Figura 4), planta cosmopolita de origem tropical, é cultivada tradicionalmente em pequenas e médias propriedades, o que potencializa seu valor social como geradora de renda e de empregos no campo (DEVIDE et al., 2010). Seu cultivo é plenamente necessário para a região Nordeste em virtude da inclusão social, garantia de empregos e divisas ao país, dada à sua aptidão para produção de energia (PINTO; PINTO; PITOMBEIRA, 2012).

FIGURA 4 - PARTE AÉREA (A); PARTE AÉREA DA MAMONA E FRUTO DA MAMONA (B); E SEMENTES DOS FRUTOS DA MAMONA (C)



FONTE: Adaptado de LOPES, (2012)

A cultura da mamona possui grande importância para a economia do semiárido nordestino, por sua resistência à seca, como fator fixador de mão-de-obra,

gerador de empregos e de matéria-prima indispensáveis ao desenvolvimento da região e do País (MORO et al., 2012). Segundo o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (NASCIMENTO et al., 2012) o Brasil figurou, por décadas, como o maior produtor mundial e maior exportador de seu principal subproduto, o óleo.

O óleo de mamona é utilizado na indústria de cosméticos, na indústria automotiva, como componente de polímeros ou lubrificante para motores de alta rotação e carburante de motores a diesel e como fluido hidráulico em aeronaves (ALTERNATIVA, 2009). Com isso vem despertando maior interesse nacional para a implantação do Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico do Biodiesel – PROBIODIESEL, coordenado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia e o de Combustível Verde, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, visando incentivar e aperfeiçoar a produção de um combustível que seja ao mesmo tempo economicamente viável e apresente vantagens ambientais em relação ao seu concorrente fóssil, o diesel (SILVA et al., 2005).

Entre as oleaginosas cultivadas no Brasil, a mamoneira destaca-se pela rusticidade e adaptabilidade a condições adversas de clima e solo, pelo rápido crescimento, elevada produção e considerável teor de óleo em suas sementes (GIRELI et al., 2022). Esta espécie é possivelmente originária da Etiópia ou da Ásia e apresenta grande potencial produtivo, notadamente em áreas semiáridas que dispõem de poucas alternativas agrícolas viáveis (LACERDA et al., 2015).

Diversos materiais orgânicos e inorgânicos têm sido utilizados para a formulação de substratos, para a produção de mudas, havendo necessidade de se determinar os mais apropriados para cada espécie de forma a atender sua demanda quanto a fornecimento de nutrientes e propriedades físicas como retenção de água, aeração, facilidade para penetração de raízes e não ser favorável à incidência de doenças (GOMES et al., 2017). O substrato precisa também ser um material abundante na região e ter baixo custo, razão pela qual geralmente se utilizam resíduos agroindustriais (MOURA, 2012). Entre os materiais frequentemente utilizados como substrato, citam-se: casca de arroz carbonizada, esterco bovino (LIMA et al., 2006), bagaço de cana (GODINHO; SPADIM; DE LIMA CANEPPELE, 2021), composto orgânico (RODRIGUES et al., 2011) dentre outros.

Assim sendo, o plantio de culturas bioenergéticas está sendo estimulado para substituir o petróleo, fonte de energia não renovável que é a causa principal do efeito

estufa. Porém, há de se ter cautela, em razão de possíveis interferências na segurança alimentar mundial, por meio da redução e/ou transferência de áreas tradicionais de culturas alimentares para a bioenergia (GODINHO; CANEPPELE; GASPAROTTO, 2021).

Com teor de óleo nas sementes de aproximadamente 48%, é uma espécie vegetal que apresenta uma perspectiva aceitável para o cultivo visando à produção de biodiesel (LACERDA et al., 2015). O óleo de mamona ou de rícino extraído das sementes tem características singulares classificando-o como um dos mais versáteis da natureza. Isto possibilita uma ampla gama de utilização industrial com utilidade só comparável à do petróleo com vantagem, porém, de ser um produto renovável o que dá, à cultura, um potencial econômico relevante e estratégico ao Brasil (HOFFMAN et al., 2007).

Além disso, produz quantidade considerável de biomassa, suas folhas podem servir de alimento para o bicho da seda, as hastes contêm celulose para fabricação de papel e das sementes são obtidos o óleo e a torta, ricos em proteína (BATISTA; GOMES, 2021).

Solos que recebem torta de mamona apresentam atividade microbiana maior quando comparados com solos que recebem esterco bovino ou bagaço de cana. A mineralização da torta de mamona ocorre de forma intensa, sendo que seus nutrientes são rapidamente liberados e disponibilizados para as plantas (GOMES et al., 2017). Dessa forma, a torta de mamona representa um aporte de nutrientes às plantas além de possuir ação complementar como nematicida (LINS et al., 2013).

Com a industrialização e com a busca por sustentabilidade, a geração de energia deverá ser advinda de fontes sustentáveis como por exemplo, a biomassa que oferece grandes vantagens energéticas, ambientais e econômicas (ULLAH et al., 2015). Os biocombustíveis têm demonstrado um grande potencial para a substituição dos derivados de petróleo (GODINHO; CANEPPELE, 2021).

Nessas biomassas vegetais são encontrados materiais lignocelulósicos de grande importância por serem usados na produção de biocombustível, principalmente o biodiesel (RAMOS et al., 2015). A biomassa lignocelulósica utilizada pode ser encontrada em diversos resíduos agrícolas ou excedentes de atividades agrícolas, uma vez que por meio de tratamentos químicos, termoquímicos ou rotas bioquímicas, obtém-se o produto alvo, reduzindo impactos ambientais, como a poluição do ar

atmosférico pela emissão de poluentes por veículos automotores (SIQUEIRA et al., 2016).

3. CELULA VEGETAL

3.1 PAREDE CELULAR

As células vegetais, como a biomassa, possuem algumas características, incluindo plastídios, vacúolos e parede celular. A parede celular é responsável principalmente por proteger a célula contra a entrada excessiva de água e patógenos, além de garantir forma e rigidez. Ela também está envolvida na absorção, transporte e secreção de substâncias (SANTOS, et al., 2013).

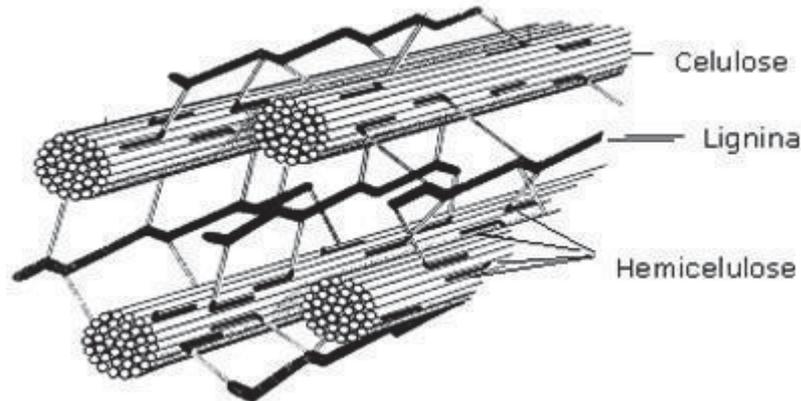
A parede celular vegetal é formada por uma mistura complexa de polissacarídeos e outros compostos secretados pela célula, organizados de forma bem estruturada através de ligações covalentes e não-covalentes (TAIZ, et al., 2002).

O principal carboidrato da parede celular é a celulose. A celulose é um polissacarídeo fibrilar que representa cerca de 15% a 30% do peso seco das paredes celulares primárias e uma porcentagem maior nas secundárias. Este polímero é formado pela união de moléculas de β -glicose através de ligações β (1-4) glicosídicas (CONTI, 2007).

Além da celulose, a parede celular também contém hemicelulose e lignina. A hemicelulose é composta principalmente por moléculas de xilose e galactose, enquanto a lignina é feita de substâncias complexas que representam cerca de 30% dos carbonos na biosfera. A lignina dá rigidez à parede celular e, nas partes de madeira, age como um agente de ligação permanente, tornando a estrutura resistente ao impacto, compressão e dobra (ROSA, 2003).

A organização desses compostos nas plantas pode ser vista na Figura 5.

FIGURA 5 - ESTRUTURA DA PAREDE CELULAR DAS PLANTAS (CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA)



FONTE: Adaptado de (Apezzato-Daglória & Carmello-Guer, 2012).

A composição e estrutura da parede celular influenciam fortemente os processos de hidrólise e fermentação. A composição básica da biomassa lignocelulósica depende do vegetal de origem e, no caso de biomassas agrofloretais residuais, da região, idade e período de coleta do material (SILVA, 2010).

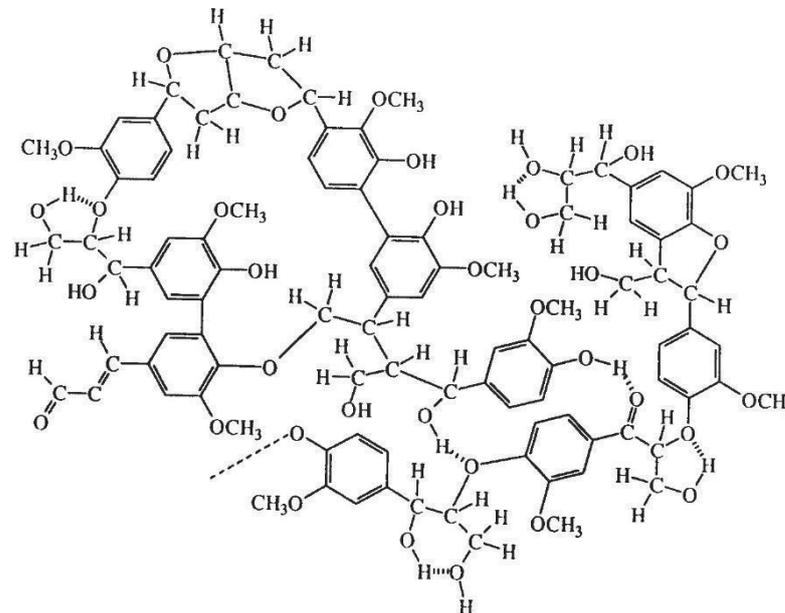
3.2 LIGNINA

A lignina é o que dá força mecânica às plantas. Sem esse polímero, algumas estruturas perdem sustentação, como é o caso das algas, fungos e líquens que não têm lignina. Mesmo com muitos estudos, a estrutura completa da lignina ainda não é totalmente conhecida, devido à grande variação de sua composição entre diferentes plantas e até mesmo entre partes da mesma planta (SILVEIRA et al., 2009).

Geralmente, o teor de lignina nas madeiras de coníferas é maior (25-35%) do que nas madeiras de folhosas (18-25%). A parede secundária interna (S3) tem até 87% de hemicelulose, com pouca ou nenhuma lignina. A parede secundária média (S2), geralmente a mais espessa, tem em média 54% de celulose. A lamela média pode ter até 84% de lignina, o que significa que a maior concentração de lignina está na parte exterior da célula (CARVALHO et al., 2009).

A lignina é uma substância amorfa, sendo o último componente adicionado à parede celular durante o crescimento (Figura 6). Ela se infiltra nas fibrilas de celulose e "cola" diferentes células. Sua concentração varia de acordo com as matérias-primas vegetais, podendo ser quase nula em fibras como o algodão e chegar a até 39%, dependendo do tipo de madeira (MARTELLI, 2014).

FIGURA 6 - ESTRUTURA QUÍMICA DA LIGNINA



FONTE: Adaptado de Vidal, Vidal & Coelho de Paula (2021).

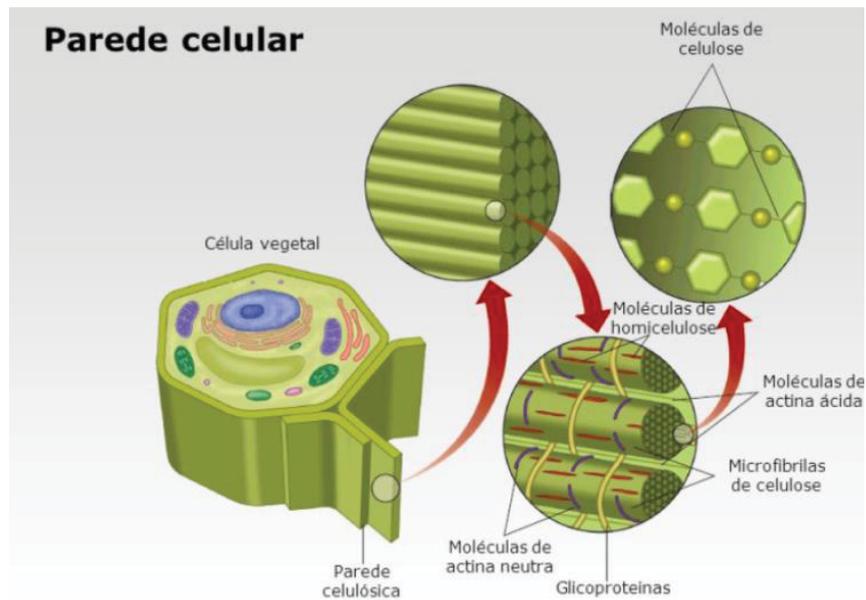
Apesar de ser descartada no processo de hidrólise, a lignina pode ser uma fonte de estruturas químicas aromáticas, com grande potencial para a produção de produtos à base de lignina e insumos para a indústria química. É muito utilizada na indústria para obter energia, tornando-se uma alternativa lucrativa economicamente e reduzindo a dependência energética em termos ambientais (PEREIRA Jr. et al., 2008).

3.3 CELULOSE

O termo celulose foi mencionado pela primeira vez no século XIX pelo químico francês Anselme Payen. Ele determinou a fórmula molecular $C_6H_{10}O_5$ ao analisar um material fibroso resistente extraído de diversos tecidos vegetais.

A celulose é encontrada em grandes quantidades na parede celular primária das plantas. Essa parede é firme, mas também flexível, permitindo a expansão das células. Além da celulose, também encontramos hemicelulose, um tipo de polissacarídeo, que ajuda a dar elasticidade às fibras de celulose. A hemicelulose age como uma matriz onde as microfibrilas de celulose se organizam. Isso faz com que a parede celular das plantas seja bem estruturada e flexível, permitindo que as células cresçam de maneira ordenada, conforme Figura 7.

FIGURA 7 - ESTRUTURA DA CELULOSE NA CÉLULA VEGETAL



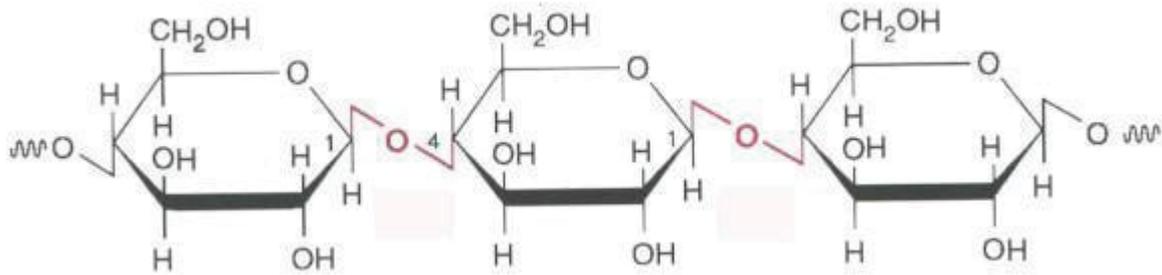
FONTE: Adaptado de Appezzato-Daglória & Carmello-Guer (2012).

A celulose é uma das cadeias poliméricas mais comuns e é considerada uma fonte inesgotável de matéria-prima para o desenvolvimento sustentável, com uma produção anual de cerca de $1,5 \times 10^{12}$ toneladas (KLEMM, et al., 2005).

A celulose é o biopolímero mais presente na parede celular dos resíduos lignocelulósicos, seguida de hemicelulose e lignina (SILVA et al., 2018), sendo que nesses últimos anos muito se vem estudando para encontrar o melhor método de obtenção de biodiesel a partir da celulose o qual demanda vários processos, a citar: pré-tratamento da biomassa que faz com que a parede celular seja quebrada, e melhorando o aproveitamento da celulose disponível, isolando os açúcares e removendo lignina para posteriormente ocorrer o processo de fermentação.

A celulose é composta por moléculas de glicose em uma estrutura linear, com 6 carbonos e ligações que unem o carbono 1 ao 4 por meio de ligações β 1,4 (Figura 8).

FIGURA 8 - ESTRUTURA QUÍMICA DA CELULOSE



FONTE: (GONÇALVES & LORENZI, 2022).

Uma molécula de celulose pode ter áreas com estrutura ordenada e rígida (celulose cristalina) e outras áreas com estrutura flexível (celulose amorfa). Essas variações fazem com que a celulose seja insolúvel em água (CASTRO, 2009). Na região cristalina, as fibras são mais rígidas e difíceis de dissolver, enquanto na região amorfa, as moléculas são menores e mais fáceis de quebrar, permitindo um acesso mais fácil às enzimas.

As enzimas que atuam na hidrólise da celulose são chamadas celulasas, compostas por endoglucanase, exoglucanase e β -glucosidase. Essas enzimas, estudadas desde a Segunda Guerra Mundial, são atualmente a forma mais eficiente de hidrólise da celulose para liberar glicose. Outro tipo de hidrólise é a ácida, que utiliza ácido clorídrico ou outro ácido para quebrar a celulose, mas ainda não é tão eficiente quanto as celulasas.

Um dos principais desafios na produção de etanol 2G é "desmontar" a parede celular para liberar os polissacarídeos como estrutura de açúcares fermentáveis. Esse problema tem mostrado avanços na comunidade científica, com possíveis soluções para o aproveitamento da celulose como fonte de produção (SANTOS, et al., 2012). A tabela indica o teor de celulose em diversos materiais.

TABELA 1 - TEOR DE CELULOSE EM DIVERSAS BIOMASSAS

Materiais lignocelulósicos	Celulose (%)	Lignina (%)
Madeira dura	45-55	18-25
Madeira mole	45-50	25-35
Espigas de milho	45	15
Gramas	25-40	20
Palha de trigo	30	15
Lixo	60	20
Folhas	15-20	0
Dejetos de suínos	6	NA
Esterco bovino sólido	1,6-4,7	2,7-5,7

FONTE: Adaptado de Godinho (2018).

Alguns materiais não são economicamente viáveis para produção devido à baixa porcentagem de celulose, como os dejetos suínos, que mostram apenas 6% de celulose. Outros materiais, no entanto, apresentam um alto potencial de produção.

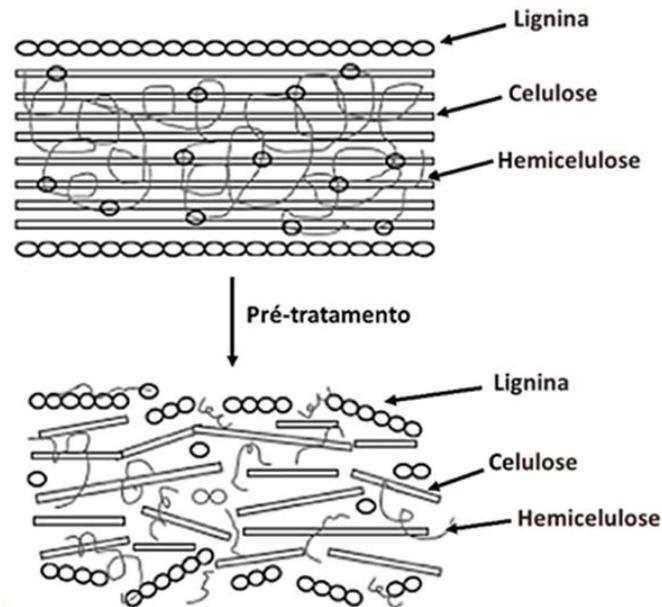
Há várias questões relacionadas às etapas de processamento, como os novos resíduos gerados e a necessidade de pós-tratamento (BONOMI, 2010).

3.4 PRÉ-TRATAMENTO

A celulose é o biopolímero mais presente na parede celular dos resíduos lignocelulósicos, seguida de hemicelulose e lignina (SILVA et al., 2018), sendo que nesses últimos anos muito se vem estudando para encontrar o melhor método de obtenção de biodiesel a partir da celulose o qual demanda vários processos, a citar: pré-tratamento da biomassa que faz com que a parede celular seja quebrada, e melhorando o aproveitamento da celulose disponível, isolando os açúcares e removendo lignina para posteriormente ocorrer o processo de fermentação.

O objetivo do pré-tratamento é remover ou modificar a estrutura da lignina para facilitar o ataque enzimático, evitando a degradação da célula (CARDONA et al., 2014). Os pré-tratamentos químicos podem ser definidos como técnicas que envolvem agentes químicos tais como ácidos, bases e solventes orgânicos (GODINHO et al., 2022), conforme Figura 9.

FIGURA 9 - EFEITOS DO PRÉ-TRATAMENTO EM RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS



FONTE: Adaptado de Godinho et al. (2022).

O pré-tratamento ácido consiste em tratar a biomassa para solubilizar a hemicelulose com o fim de obter uma celulose mais acessível. Os pré-tratamentos alcalinos consistem na remoção da lignina e tendem causar um inchamento da biomassa, provocando uma quebra das ligações lignina-carboidrato, além de perturbação na estrutura da lignina (GODINHO et al, 2019).

Os materiais lignocelulósicos representam uma alternativa ao uso de materiais açucarados, como o açúcar extraído da cana, atualmente utilizado como matéria-prima na produção de etanol. Esses materiais são considerados vantajosos por serem fontes renováveis de energia, benéficas ao meio ambiente, além de não competirem com a agricultura voltada à alimentação humana e animal. Outra vantagem importante é que são amplamente disponíveis e de baixo custo (RUBIN, 2008).

A estrutura do material lignocelulósico que constitui a biomassa foi desenvolvida, ao longo da evolução, para evitar a degradação por micro-organismos e animais. Por isso, existem diversos mecanismos de resistência à quebra de ligações químicas, como a lignina, que atua como uma barreira física e restringe o acesso das enzimas às frações açucaradas; o grupamento acetil da hemicelulose, que dificulta o reconhecimento catalítico das enzimas e reduz o rendimento da hidrólise; e a

cristalinidade da celulose, que diminui sua área superficial, essencial para a ação das enzimas celulasas (ZHAO et al, 2012).

O pré-tratamento ácido é uma técnica amplamente utilizada para a solubilização dos açúcares na biomassa lignocelulósica, baseando-se na adição de um ácido mineral ao material, que é então submetido a diferentes condições de temperatura e tempo. A recuperação dos açúcares no pré-tratamento com ácido diluído ocorre através da hidrólise das ligações glicosídicas entre os açúcares que formam principalmente a hemicelulose.

De acordo com Fengele e Wegener (1989), há uma correlação entre a taxa de hidrólise e o tipo de açúcar presente no polissacarídeo. Essa característica de cada açúcar está relacionada à estrutura da cadeia polissacarídica, sendo que os anéis de cinco carbonos (furanos) são hidrolisados mais rapidamente em comparação com os anéis de seis carbonos (piranos), devido à maior tensão angular necessária para manter a estrutura do anel.

A transesterificação alcalina homogênea é o método mais amplamente utilizado para a produção de biodiesel em larga escala no mundo. Essa reação química reversível envolve a interação de um triacilglicerídeo (óleos ou gorduras) com três moléculas de um álcool de cadeia curta, como metanol ou etanol, resultando na formação de três moléculas de ésteres alquílicos (biodiesel) e uma molécula de glicerina como subproduto. Nesse processo, utiliza-se uma base, geralmente hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), que promove a formação do íon alcóxido, atuando como catalisador homogêneo da reação (RAMOS et al., 2017).

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA – REGRESSÃO

A estatística desempenha um papel crucial principalmente no agronegócio, fornecendo ferramentas essenciais para a tomada de decisões informadas e eficientes (FIGUEREDO et al, 2023). Através da análise de dados, os empresários podem otimizar a produção, reduzir custos e aumentar a rentabilidade. Por exemplo, *“a análise estatística de dados de produtividade e consumo de insumos pode ajudar a identificar áreas de melhoria e a implementar práticas agrícolas mais eficazes”*.

Um dos principais exemplos de aplicação da estatística no agronegócio é o uso da estatística para a gestão de riscos (GAZZOLA et al. 2023), pois a análise de

dados históricos sobre clima, preços de mercado e produção pode ajudar os agricultores a planejarem suas atividades e tomar decisões mais seguras, isso é particularmente importante em regiões onde as condições climáticas são imprevisíveis e os preços dos produtos agrícolas podem variar significativamente.

A estatística também é utilizada para a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, práticas agrícolas e a definição de estratégias comerciais, através da análise de dados sobre demanda, oferta e tendências de mercado. Os produtores rurais podem identificar oportunidades de negócio e ajustar suas estratégias de produção e comercialização. Isso ajuda a garantir a competitividade e a sustentabilidade do agronegócio (BENÍCIO et al., 2023).

Dentro da estatística, a regressão estatística é uma técnica analítica fundamental para modelar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes (FRASER, BUTLER & SHAVLIK, 2005). No contexto da produção de biodiesel a partir da mamona, a regressão estatística ajuda a entender como diferentes fatores, como métodos de pré-tratamento e condições de cultivo, influenciam a quantidade de celulose e lignina presentes na biomassa (KAAKS et al., 2002). Isso possibilita ajustes precisos nas práticas agrícolas e industriais, resultando em maior eficiência e produtividade, além disso, a regressão facilita a identificação de correlações significativas, permitindo a tomada de decisões baseadas em dados robustos e confiáveis, o que é essencial para avanços científicos e tecnológicos (FRASER, BUTLER & SHAVLIK, 2005).

Existem diversos tipos de regressão na estatística, sendo os mais comuns a Regressão Linear Simples, Regressão Linear Múltipla, Regressão Logística e Regressão Polinomial (ROSNER, WILLETT & SPIEGELMAN, 1989).

Segundo os mesmos autores, a Regressão Linear Simples envolve uma única variável independente, enquanto a Regressão Linear Múltipla considera múltiplas variáveis independentes. A Regressão Logística é utilizada quando a variável dependente é categórica, permitindo prever a probabilidade de um evento ocorrer, já a Regressão Polinomial é empregada quando a relação entre as variáveis não é linear, utilizando polinômios para melhor ajuste dos dados.

Os coeficientes obtidos na análise de regressão são fundamentais para a interpretação dos resultados (FERREIRA, 2018). Cada coeficiente representa a variação esperada na variável dependente para uma unidade de variação na variável

independente, mantendo as demais variáveis constantes (ROSNER, WILLETT & SPIEGELMAN, 1989).

Um coeficiente positivo indica que, à medida que a variável independente aumenta, a variável dependente também tende a aumentar, enquanto um coeficiente negativo sugere uma relação inversa (FRASER, BUTLER & SHAVLIK, 2005). A significância estatística dos coeficientes é avaliada por meio de testes, como o teste t , que ajuda a determinar se a relação observada é estatisticamente relevante (FERREIRA, 2018).

A validação do modelo de regressão é um passo crucial para garantir a sua eficácia, isso pode ser realizado através de técnicas como a divisão dos dados em conjuntos de treinamento e testes, permitindo avaliar a capacidade preditiva do modelo em dados não vistos, ajudando a assegurar que o modelo é robusto e pode ser utilizado para previsões futuras com confiança (ROSNER, WILLETT & SPIEGELMAN, 1989).

Uma equação de regressão estatística é usada para modelar a relação entre uma variável dependente (resposta) e uma ou mais variáveis independentes (preditoras). O modelo mais comum é a regressão linear simples, que assume uma relação linear entre as variáveis. A equação de regressão linear (equação 1) simples pode ser representada da seguinte maneira, conforme (FERREIRA, 2018).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

Y é a variável dependente.

X é a variável independente.

β_0 é o intercepto (valor de Y quando X é zero).

β_1 é o coeficiente de regressão (inclinação da linha de regressão).

ε é o termo de erro (diferença entre os valores observados e previstos de Y).

Para múltiplas variáveis independentes, temos a regressão linear múltipla, cuja equação pode ser representada assim. (Equação 2)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2)$$

Onde:

X_1, X_2, X_n são as variáveis independentes.

$\beta_1, \beta_2, \beta_n$ são os coeficientes de regressão.

CAPÍTULO 2 – QUANTIFICAÇÃO QUÍMICA DA BIOMASSA

1. INTRODUÇÃO

Biomassa, derivada do termo em inglês biomass, é definida pelo Ministério de Minas e Energia (MME) como uma composição de origem vegetal ou animal capaz de gerar energia. A biomassa abrange diversos tipos de matérias-primas (Figura 10) que, ao serem reaproveitadas, recebem o Selo 7 da Organização das Nações Unidas (ONU) para Energia Acessível e Limpa. Esse reaproveitamento contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O Brasil possui um índice de 72,67 em 100 e ocupa a 53ª posição entre os 193 países avaliados pela ONU (ONU, 2022).

A produção de biomassa pode ser realizada a partir de resíduos industriais e urbanos, oferecendo uma destinação mais apropriada para os resíduos gerados em áreas urbanas. Isso contribui para evitar a contaminação dos lençóis freáticos, um dos principais desafios ambientais enfrentados pela humanidade nos tempos modernos.

FIGURA 10 - TIPOS DE ENERGIA DE BIOMASSA



FONTE: Autor (2024).

A biomassa engloba toda matéria vegetal, incluindo os produtos e subprodutos da fotossíntese. Esses materiais compreendem colheitas e produtos agrícolas, formados principalmente por folhas e troncos de plantas, comumente conhecidos como palha. Além disso, a biomassa gerada como resíduo agroindustrial inclui biocombustíveis produzidos em plantas industriais voltadas à transformação de alimentos ou à produção de agroenergia. Esses materiais armazenam energia química, acumulada por meio da conversão de energia, e podem liberá-la através da combustão ou de processos diversos (MME, 2007).

O desenvolvimento tecnológico da sociedade contemporânea vem trazendo cada vez mais a percepção da necessidade de um controle rigoroso de produtos e processos produtivos. Isso é essencial tanto para garantir que os produtos consumidos atendam a parâmetros de qualidade quanto para mitigar os impactos negativos ao meio ambiente gerados pelos processos produtivos. Diante desse cenário, a preocupação com a sustentabilidade das cadeias produtivas tem ganhado destaque, tornando-se um fator de forte apelo comercial e social, especialmente em setores como o agronegócio.

Nos últimos anos, o agronegócio tem buscado reduzir a emissão de gases do efeito estufa, aumentar a produtividade utilizando menores áreas cultivadas, diminuir o uso de agrotóxicos e adotar práticas sustentáveis. Um exemplo relevante nesse contexto é a agroenergia, representada pelo biodiesel e pelo etanol, que se posicionam no mercado como combustíveis verdes e sustentáveis (Silva et al., 2020).

A química moderna desempenha um papel econômico fundamental nas atividades industriais, com a crescente importância de sua aplicação, especialmente após a implementação das biorrefinarias e dos princípios da química verde (SILVA et al., 2020).

Estes princípios fazem uso do potencial da biomassa, tanto de origem vegetal quanto animal. No entanto, a biomassa vegetal apresenta os maiores desafios e as maiores possibilidades de exploração industrial devido à sua diversidade química. Nesse cenário, a química analítica desempenha um papel crucial nas cadeias produtivas da biomassa, contribuindo para a determinação de sua composição, caracterização das propriedades físico-químicas e quantificação de espécies de interesse (PEREIRA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021).

Segundo os mesmos autores, as análises químicas são essenciais para garantir a qualidade das matérias-primas, assegurar os rendimentos dos processos produtivos e possibilitar o desenvolvimento de novos produtos e materiais que agreguem valor à biomassa. Técnicas e métodos analíticos são fundamentais para apoiar a criação de legislações reguladoras de mercado e ambientais, além de desempenharem um papel importante na exploração da biomassa, servindo como tecnologias de suporte em todas as etapas de processamento de cadeias produtivas como a da cana-de-açúcar, soja, milho, mamona, florestas, papel e celulose, resíduos agroindustriais, entre outras

As cadeias produtivas da biomassa geralmente exigem análises químicas capazes de abranger muitas amostras a baixo custo, uma característica comum nos segmentos agroindustriais (VAZ JÚNIOR; SOARES, 2014). Essas análises não se limitam apenas à produção, mas também são essenciais nas áreas de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Dessa forma, a abordagem analítica deve seguir etapas pré-estabelecidas, garantindo que cada aplicação seja válida.

O desenvolvimento tecnológico da sociedade contemporânea vem trazendo cada vez mais a percepção da necessidade de um controle rigoroso de produtos e processos produtivos, isso é essencial tanto para garantir que os produtos consumidos atendam a parâmetros de qualidade quanto para mitigar os impactos negativos ao meio ambiente gerados pelos processos produtivos (PEREIRA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021).

Diante desse cenário, a preocupação com a sustentabilidade das cadeias produtivas tem ganhado destaque, tornando-se um fator de forte apelo comercial e social, especialmente em setores como o agronegócio. Nos últimos anos, o agronegócio tem buscado reduzir a emissão de gases do efeito estufa, aumentar a produtividade utilizando menores áreas cultivadas, diminuir o uso de agrotóxicos e adotar práticas sustentáveis. Um exemplo relevante nesse contexto é a agroenergia, representada pelo biodiesel e pelo etanol, que se posicionam no mercado como combustíveis verdes e sustentáveis (SILVA et al., 2020).

A química moderna desempenha um papel econômico fundamental nas atividades industriais, com a crescente importância de sua aplicação, especialmente após a implementação das biorrefinarias e dos princípios da química verde (SILVA et al., 2020).

Estes princípios fazem uso do potencial da biomassa, tanto de origem vegetal quanto animal. No entanto, a biomassa vegetal apresenta os maiores desafios e as maiores possibilidades de exploração industrial devido à sua diversidade química (GODINHO et al, 2018).

Nesse cenário, a química analítica desempenha um papel crucial nas cadeias produtivas da biomassa, contribuindo para a determinação de sua composição, caracterização das propriedades físico-químicas e quantificação de espécies de interesse (VAZ JÚNIOR; SOARES, 2014). As análises químicas são essenciais para garantir a qualidade das matérias-primas, assegurar os rendimentos dos processos produtivos e possibilitar o desenvolvimento de novos produtos e materiais que agreguem valor à biomassa (FRASER, BUTLER & SHAVLIK, 2005).

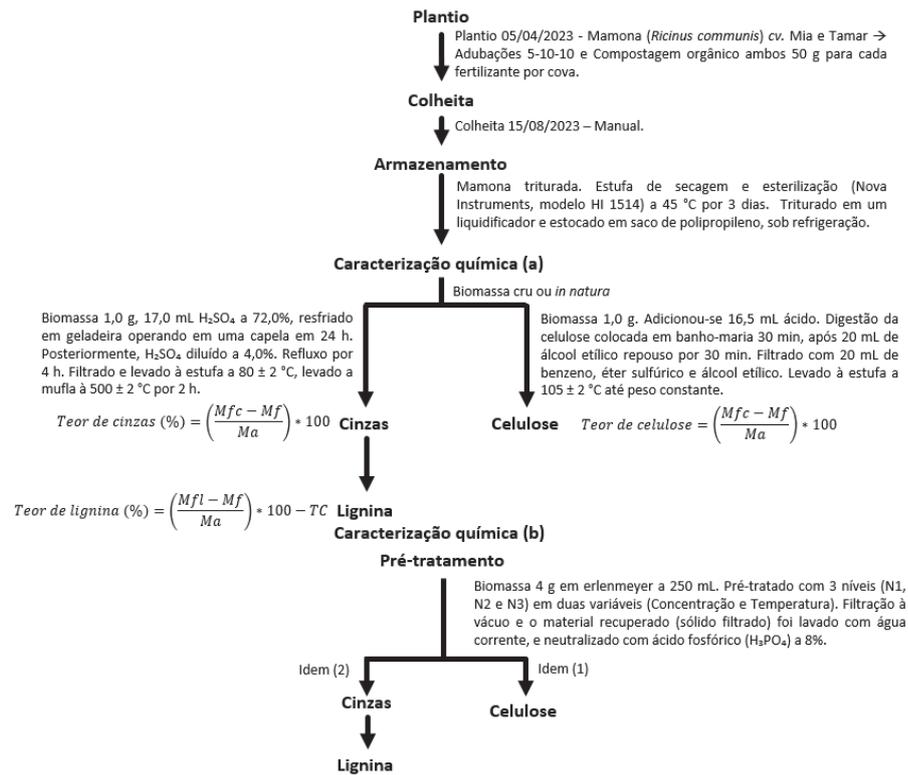
Técnicas e métodos analíticos são fundamentais para apoiar a criação de legislações reguladoras de mercado e ambientais, além de desempenharem um papel importante na exploração da biomassa, servindo como tecnologias de suporte em todas as etapas de processamento de cadeias produtivas como a da cana-de-açúcar, soja, milho, mamona, florestas, papel e celulose, resíduos agroindustriais, entre outras (PEREIRA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021).

As cadeias produtivas da biomassa geralmente exigem análises químicas capazes de abranger muitas amostras a baixo custo, uma característica comum nos segmentos agroindustriais (VAZ JÚNIOR; SOARES, 2014). Essas análises não se limitam apenas à produção, mas também são essenciais nas áreas de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Dessa forma, a abordagem analítica deve seguir etapas pré-estabelecidas, garantindo que cada aplicação seja válida.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 11 apresenta um fluxograma com a sequência dos procedimentos experimentais realizados neste trabalho.

FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DAS METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS PARA A CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA A PARTIR DE PRÉ-TRATAMENTO DE NAOH DA MAMONA



FONTE: Autor (2024).

2.1 BIOMASSA DA MAMONA

A mamona foi colhida em uma lavoura na cidade de Palotina – PR no Colégio Agrícola Estadual Adroaldo Augusto Colombo de latitude 24°20'47" e longitude 53°45'16" com altitude 365 m, onde selecionou folhas sem aparência de doença ou ataque de pragas. Antes do pré-tratamento, a biomassa foi seca em estufa de secagem e esterilização (Nova Instruments, modelo HI 1514) à temperatura de 45 °C por 3 dias. Em seguida triturada e estocada em sacos de polipropileno, sob refrigeração, até o uso.

2.2 PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NAOH)

A biomassa foi submetida ao pré-tratamento descrito a seguir com NaOH realizado de acordo com procedimento descrito por GODINHO et al., (2019). Foi pesado 4,0 g da biomassa triturada e seca, transferindo-se para um erlenmeyer de 250 mL juntamente com as soluções de NaOH a 1,0; 2,0 e 3,0% em concentração, sendo 10,0; 20,0 e 30,0 mL de solução por grama de biomassa, totalizando 40,0 mL; 80,0 mL e 120,0 mL, com temperaturas entre 80; 90 e 100 °C. A suspensão foi levada ao banho-maria nas temperaturas entre 80 a 100 °C por 30 min. Após o tempo do banho-maria a suspensão foi submetida à filtração a vácuo onde o material recuperado (sólido filtrado) foi lavado com água corrente, neutralizado com ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado.

Após o pré-tratamento, as amostras foram acondicionadas em bandejas de metal, levando-as a uma estufa para secagem a temperatura de 65 °C, até peso constante das amostras.

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística dos experimentos foi utilizado o software Matlab® sob licença do Grupo de Pesquisa Agroenerbio FZEA/USP. No primeiro momento foi realizado uma análise descritiva para observar a resposta da normalidade com o teste de Shapiro-Wilk e posterior estimar os efeitos principais e a interação entre as variáveis por meio de Análise de Variância (ANOVA), juntamente com os gráficos dos efeitos e análise de resíduos a um nível de significância a 5% de probabilidade ($\alpha = 0,05$). Os ensaios foram realizados em quadruplicata.

2.4 MÉTODOS ANALÍTICOS

2.4.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CELULOSE

A metodologia para a determinação da celulose foi adaptada de GODINHO et al., (2021). Foi pesado 1,0 g da biomassa, transferindo-se as amostras para erlenmeyer e adicionando-se 16,5 mL de reagente ácido, previamente preparado com

ácido acético glacial (CH_3COOH) (72,73%), água destilada (18,18%) e ácido nítrico (HNO_3) (9,09%), ou seja, 12,0 mL de ácido acético glacial, 3,0 mL de água destilada e 1,5 mL de ácido nítrico. Para a etapa de digestão da celulose as amostras foram colocadas em banho-maria a 90°C , por 30 min. Após a digestão, foi adicionado 20,0 mL de álcool etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) para o processo de filtração, na sequência foi adicionado 20,0 mL de benzeno a frio (C_6H_6) e, finalmente adicionando-se 20,0 mL de éter sulfúrico ($(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$). O conteúdo filtrado foi levado à estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante para fins de calcular o teor de celulose presente na amostra, a partir da Equação 03.

$$\text{Teor de celulose} = \left(\frac{M_{fa} - M_f}{M_a} \right) * 100 \quad (03)$$

Onde:

M_{fc} massa do funil (g) + celulose (g).

M_f massa do funil (g).

M_a massa da amostra (g).

Teor de celulose teor de celulose (%).

2.4.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LIGNINA

A determinação da lignina seguiu o método adaptado e proposto por GODINHO et al., (2019). Adicionando-se 1,0 g da biomassa transferindo-se cada amostra para um béquer e em seguida adicionou-se 17,0 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) (72,0%) resfriado em geladeira de 10 a 15°C , antes do uso. As amostras foram agitadas com um bastão de vidro, até homogeneização, formando uma pasta. As amostras foram colocadas em uma capela para deixar em digestão por 24 h. Posteriormente o ácido sulfúrico que estava na digestão junto com a biomassa foi diluída para 4,0% adicionando-se 289,0 mL de água destilada. O conteúdo foi transferido para um balão de fundo redondo de 500,0 mL e mantido em refluxo por 4 h. Por fim o conteúdo do balão foi filtrado e levado à estufa a $80 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante. Após a secagem em estufa, o material foi incinerado, então colocou-se as amostras em cadinhos e levou-as à mufla a $500 \pm 2^\circ\text{C}$ por 2 h, pesando-se a amostra

incinerada, para determinação do teor de cinza a partir da Equação 04 e teor de lignina presente na mamona pela Equação 05.

$$\text{Teor de cinzas} = \left(\frac{M_{fc} - M_f}{M_a} \right) * 100 \quad (04)$$

$$\text{Teor de lignina} = \left(\frac{M_{fl} - M_f}{M_a} \right) * 100 - TC \quad (05)$$

Onde:

M_{fc} massa do funil (g) + celulose (g).

M_{fl} massa do funil (g) + lignina após a secagem da estufa (g).

M_f massa do funil (g).

M_a massa da amostra (g).

Teor de lignina teor de lignina (%).

Teor de cinzas TC teor de cinzas (%).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de celulose (%) e lignina (%) encontrados no cruzamento das 3 variáveis independentes de cada tratamento para ambas as variedades de mamona (MIA e TAMAR) estão dispostos na Tabela 2.

TABELA 2 - AGRUPAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS ENCONTRADOS.

	Celulose (%)		Lignina (%)	
	MIA	TAMAR	MIA	TAMAR
C1T1	49,60	50,10	49,30	45,30
C1T2	49,30	50,30	49,80	45,40
C1T3	49,70	50,40	49,90	45,10
C2T1	52,20	53,60	47,30	44,10
C2T2	51,50	54,00	47,60	43,90
C2T3	51,10	53,80	47,10	43,80
C3T1	50,10	51,90	44,90	42,30
C3T2	50,60	52,00	44,20	42,10
C3T3	50,50	52,30	44,30	42,00
Média	50,51	52,14	47,04	43,78
DP	0,94	1,67	2,36	1,26
CV (%)	1,87	3,2	5,02	2,88

Legenda: C1, C2 e C3 (concentração de NaOH 1,0; 2,0 e 3,0%). T1, T2 e T3 (temperatura de 80, 90 e 100 °C). DP: Desvio-padrão. CV (%): Coeficiente de variação. Cor diferente apresenta os melhores resultados de celulose (%) e lignina (%) para ambas as variedades

FONTE: Autores (2024).

Os melhores resultados na liberação de celulose (%) utilizando biomassa lignocelulósica foram obtidos com a concentração de NaOH de 2%. Segundo um estudo publicado na Revista Brasileira de Engenharia e Ciências Ambientais por Pereira et al. (2017), essa concentração proporcionou a maior eficiência na hidrólise da celulose, resultando em uma maior produção de açúcares fermentescíveis, essenciais para a produção de etanol. A pesquisa comparou diferentes concentrações de NaOH (1%, 2% e 3%) e temperaturas de reação (120°C, 140°C e 160°C), concluindo que a combinação de 2% de NaOH e 140°C foi a mais eficaz para a conversão da biomassa em biocombustíveis.

Outro estudo, publicado na Química Nova por Silva et al. (2001), também destacou a importância da concentração de NaOH na produção de biocombustíveis. Os autores avaliaram a eficiência do processo de hidrólise utilizando diferentes concentrações de NaOH e observaram que a concentração de 2% resultou em uma

maior digestibilidade da celulose e, conseqüentemente, em uma maior produção de etanol. A pesquisa enfatizou que a otimização da concentração de NaOH é fundamental para aumentar a eficiência do processo e tornar a produção de biocombustíveis mais viável economicamente.

Além da produção de biocombustíveis, a digestibilidade da celulose na biomassa é um fator crucial para a eficiência alimentar dos ruminantes. Segundo um estudo publicado na Revista Brasileira de Zootecnia por Silva et al. (2001), a digestibilidade aparente da celulose em uma ração completa foi avaliada em bovinos de diferentes grupos genéticos, utilizando metodologias de coleta total de fezes e com indicador interno (lignina em detergente ácido - LDA). Segundo os mesmos autores, os resultados mostraram que a digestibilidade da celulose variou entre 48,27% e 45,20%, dependendo da metodologia utilizada. Esses dados indicam que a celulose é um componente importante na dieta dos bovinos e que sua digestibilidade pode influenciar diretamente a eficiência alimentar e a produção de leite e carne.

Outro estudo publicado na Revista Química Nova de Pereira et al. (2017) discutiu os desafios relacionados à produção e aplicação de enzimas celulolíticas na hidrólise da biomassa lignocelulósica. A conversão da celulose em açúcares fermentescíveis é essencial para a produção de biocombustíveis, como o etanol de segunda geração (2G), segundo os mesmos autores. No entanto, o custo das enzimas celulolíticas e a eficiência do processo de hidrólise são desafios significativos que precisam ser superados para tornar a conversão de biomassa economicamente viável (GODINHO et al, 2018). A melhoria na digestibilidade da celulose pode contribuir para a otimização desse processo e aumentar a produção de biocombustíveis sustentáveis.

Um artigo da *Proceedings of the 4th Energy in Rural Areas Conference* de Teixeira et al. (2002), descreve um processo inovador para a conversão de biomassa lignocelulósica em álcool, biogás e fertilizante natural. O pré-tratamento da biomassa com vapor a altas temperaturas e pressões aumenta a digestibilidade da celulose, permitindo a remoção de pentoses e a conversão eficiente em etanol por meio de fermentação com leveduras (TEIXEIRA et al., 2002). Esse processo não só melhora a digestibilidade da celulose, mas também contribui para a produção de biocombustíveis e fertilizantes, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis.

A Tabela 3, indica os teores de celulose (%) e lignina (%) presentes na biomassa (mamona) para cada variável do tratamento independente. Foram

realizados cálculos de média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada uma das substâncias.

TABELA 3 - AGRUPAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS ENCONTRADOS.

Variedade	<i>In natura</i>	<i>In natura</i>	Pré-tratamento	Pré-tratamento
Variedade	Celulose (%)	Lignina (%)	Celulose (%)	Lignina (%)
MIA	44,80 ^b	50,20 ^a	50,73 ^b	47,27 ^b
TAMAR	48,80 ^a	45,30 ^b	51,82 ^a	44,00 ^a
Média	46,80	47,75	51,27	45,63
R²	0,983	0,978	0,975	0,983
p-valor	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
CV (%)	1,45	1,72	2,3	3,75

Legenda: DP: Desvio-padrão. CV (%): Coeficiente de variação. R²: coeficiente de determinação. p-valor: medida de significância no teste de hipóteses.

Letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

FONTE: Autores (2024).

O coeficiente de determinação R² assume valores entre 0 e 1. Um valor de R² = 1 indicaria que 100% da variação em Y é explicada pela regressão em função de X. Portanto, um R² de 0,5 indica que a metade da variação é explicada pelo modelo, enquanto os outros 50% são atribuídos a outros fatores não incluídos na análise.

Como doutorando na área de engenharia agrícola, posso dizer que a regressão linear explica aproximadamente 50% da variação da variável dependente Y em relação à variável independente X. Quando o coeficiente de determinação R² = 0,5, isso significa que metade da variação observada em Y pode ser prevista pela variação em X. Se R² = 0, então não há nenhuma relação linear entre X e Y.

A precisão dos ensaios experimentais foi avaliada com base na classificação dos coeficientes de variação (CV), conforme proposto por Gomes (2009). Essa classificação sugere que, se o CV for inferior a 10%, o ensaio apresenta uma ótima precisão experimental. Quando o CV varia entre 10% e 15%, a precisão é considerada boa. Para valores de CV entre 15% e 20%, a precisão é regular ou aceitável. Se o CV estiver no intervalo de 20% a 30%, a precisão experimental é considerada baixa. Por fim, quando o CV é superior a 30%, o ensaio apresenta uma precisão experimental péssima.

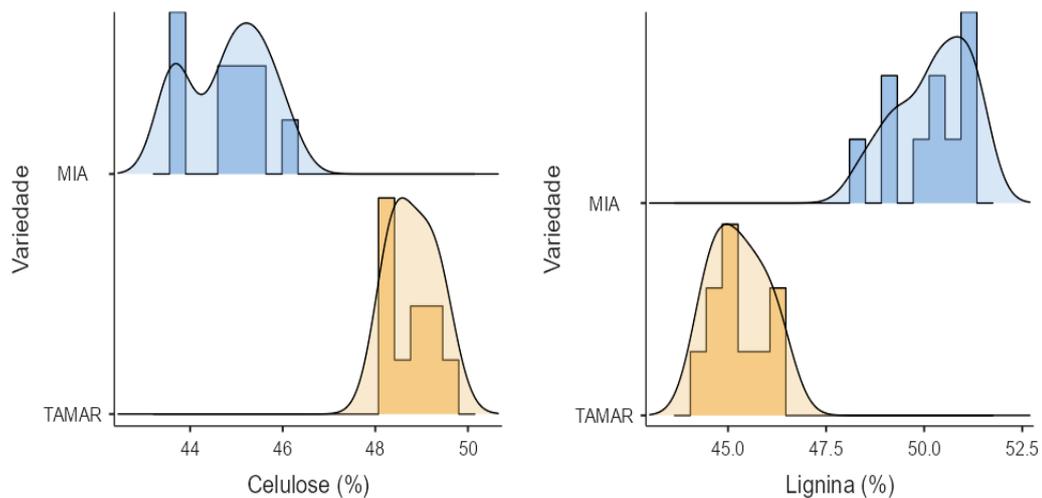
Em resumo, o coeficiente de variação oferece uma medida clara da variação nos ensaios agropecuários, sendo que a precisão do experimento aumenta à medida que o CV diminui. Dessa forma, torna-se essencial monitorar e minimizar o CV para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados experimentais.

O teor de celulose e lignina na biomassa de mamona é essencial para avaliar seu potencial como matéria-prima na produção de biocombustíveis e outros produtos químicos, sendo que a mamona apresenta uma composição significativa de celulose e lignina, componentes que influenciam diretamente as propriedades físico-químicas da biomassa, podendo assim aumentar a eficiência no processo de pirólise. De acordo com Vaz Júnior & Soares (2014) em análises de biomassa lignocelulósica, mostraram que os teores envolvidos nos métodos específicos, como secagem e análise cromatográfica apresentam maiores especificidade na amostragem desta célula tão importante.

Para uma análise visual mais eficaz, optou-se por representar os dados por meio de gráficos de colunas (histogramas), dispersão e Boxplot, utilizando o software Jamovi®. Essa escolha proporcionou uma abordagem mais precisa e eficiente na interpretação dos dados. Especificamente, o Boxplot se destaca por sua capacidade de exibir a mediana, além dos quartis primeiro e terceiro, oferecendo insights valiosos para análises estatísticas (FERREIRA et al., 2016).

Inicialmente, os resultados de celulose e lignina *in natura* foram apresentados em um histograma com densidade (Figura 12), permitindo uma visualização clara das porcentagens de lignina nas variedades MIA e TAMAR, respectivamente.

FIGURA 12 - GRÁFICOS DE HISTOGRAMA COM CURVA DE DENSIDADE PARA CELULOSE E LIGNINA *IN NATURA* TRATAMENTOS (MIA E TAMAR), MOSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS E A TENDÊNCIA DE CADA TRATAMENTO



FONTE: Autores (2024).

Podemos aferir as porcentagens de 50,20% e 45,30% das variedades MIA e TAMAR, valores relativamente altos quando comparados com a literatura, o que nos informa que o método não é ruim, mas necessita de alguns aprimoramentos.

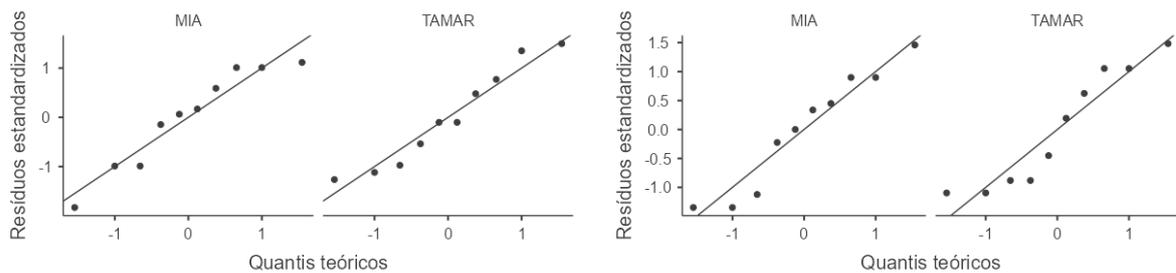
Capdeville et al. (2017), apresentaram em outro estudo sobre a porcentagem de lignina na mamona em forma de gráficos de histograma destacando as diferentes concentrações dessa substância nos tratamentos aplicados. Esses gráficos ajudam a entender a variação da lignina nos diferentes métodos de processamento e condições de cultivo.

As porcentagens encontradas foram 44,80% e 48,80% para MIA e TAMAR, respectivamente. Sendo assim, por serem porcentagens relativamente altas, e mesmo diante da concentração de lignina, verificamos um potencial significativo para produção de biodiesel.

Reforçando que a celulose desempenha um papel importante na produção de biodiesel a partir do óleo de mamona, principalmente em processos que envolvem a utilização de materiais lignocelulósicos. SILVA; SILVA & PERISSINI (2014), explicaram que a transesterificação do óleo de mamona, embora desafiada pela viscosidade do óleo e sua solubilidade em álcoois, consegue alcançar bons resultados quando se utilizam técnicas apropriadas, demonstrando a relevância dessa fonte renovável na matriz energética sustentável do país.

A Figura 13, apresenta um gráfico de dispersão que ilustra a relação entre os dados obtidos para os tratamentos (MIA e TAMAR) para celulose e lignina *in natura*. Este gráfico permite visualizar claramente como as variáveis se comportam em cada tratamento, evidenciando tendências e possíveis correlações entre os conjuntos de dados.

FIGURA 13 - GRÁFICOS DE DISPERSÃO MOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE OS DADOS DOS TRATAMENTOS (MIA E TAMAR), DESTACANDO TENDÊNCIAS E CORRELAÇÕES.



FONTE: Autores (2024).

Gráficos de resíduos padronizados são ferramentas estatísticas cruciais na análise de modelos de regressão, eles fornecem informações valiosas sobre a qualidade do ajuste do modelo e a distribuição dos erros (ROSA, BORTOLUZZI & LIMA, 2018).

Para a variedade MIA, os pontos no gráfico de dispersão mostram-se relativamente próximos da linha de referência, o que sugere que o modelo de regressão utilizado apresenta um bom ajuste. No entanto, observa-se a presença de alguns pontos mais afastados da linha, indicando a possível existência de *outliers*. Esses *outliers* podem representar dados anômalos ou variações específicas da variedade MIA, que não foram completamente capturados pelo modelo. A identificação e análise desses *outliers* são cruciais para melhorar a precisão e a robustez do modelo, garantindo assim que ele possa ser aplicado de forma confiável em diferentes cenários.

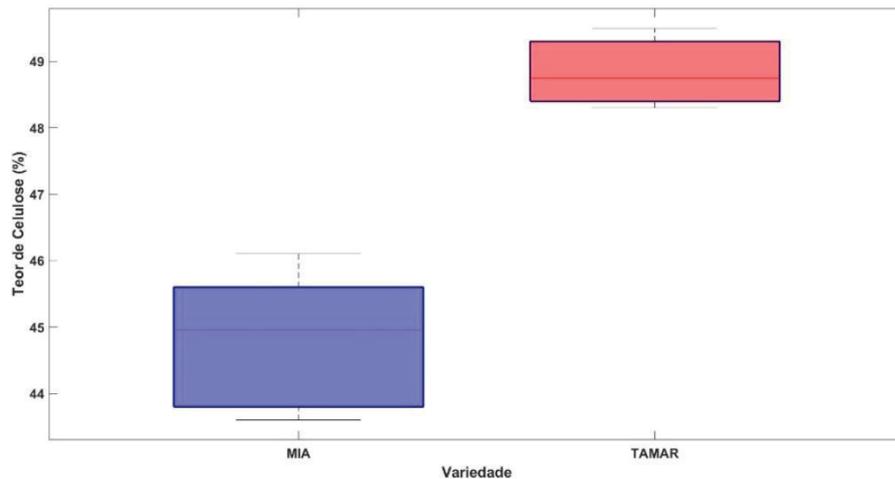
Já para a variedade TAMAR, os pontos também apresentam uma dispersão razoável ao redor da linha de referência, indicando que o modelo de regressão tem um ajuste adequado. Entretanto, há uma leve tendência dos pontos a se desviarem da linha de referência em determinadas regiões do gráfico. Essa tendência pode sugerir alguma violação das suposições do modelo, como a não normalidade dos erros ou a presença de variáveis não consideradas. A avaliação dessas tendências é

essencial para ajustar e refinar o modelo, garantindo que ele represente com maior precisão a relação entre as variáveis estudadas para a variedade TAMAR.

Podemos visualizar que a variação de dados foi muito próxima de uma função linear, ou seja, o método foi bem aproveitado em relação a coleta de dados. Isso pode ser comprovado pelo baixo desvio padrão e coeficiente de variação razoável, 0,82 e 1,72, respectivamente. Assim como na lignina, as variações de coleta foram baixas, se aproximando de uma função linear, sendo 0,68 para o desvio padrão e 1,45 para o coeficiente de variação. Os valores demonstram novamente a eficácia da coleta de dados dessa metodologia.

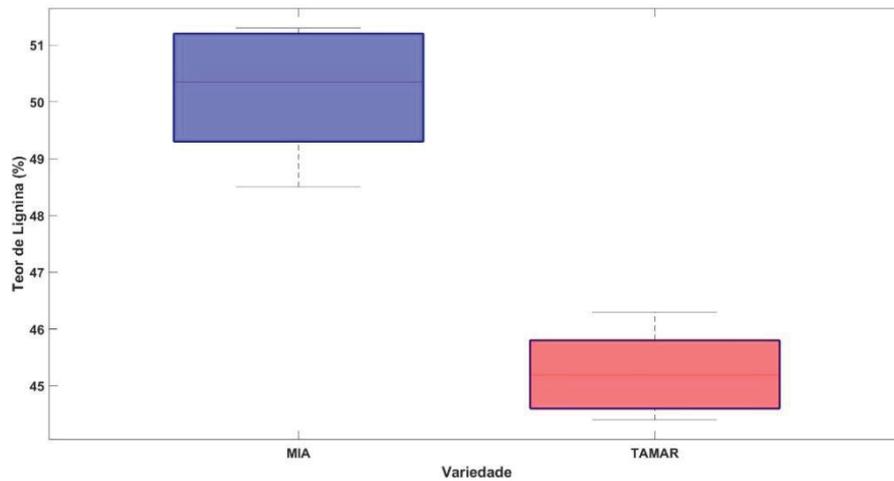
As Figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam os gráficos de Boxplot da distribuição dos resultados das variedades (MIA e TAMAR) *in natura* e pré-tratado, destacando as diferenças nos quartis, medianas e possíveis *outliers*.

FIGURA 14 - GRÁFICO DE BOXPLOT COMPARANDO OS RESULTADOS DOS TRATAMENTOS MIA E TAMAR *IN NATURA*, MOSTRANDO A DISPERSÃO, MEDIANA E POSSÍVEIS *OUTLIERS* PARA CADA TRATAMENTO PARA A CELULOSE



FONTE: Autores (2024).

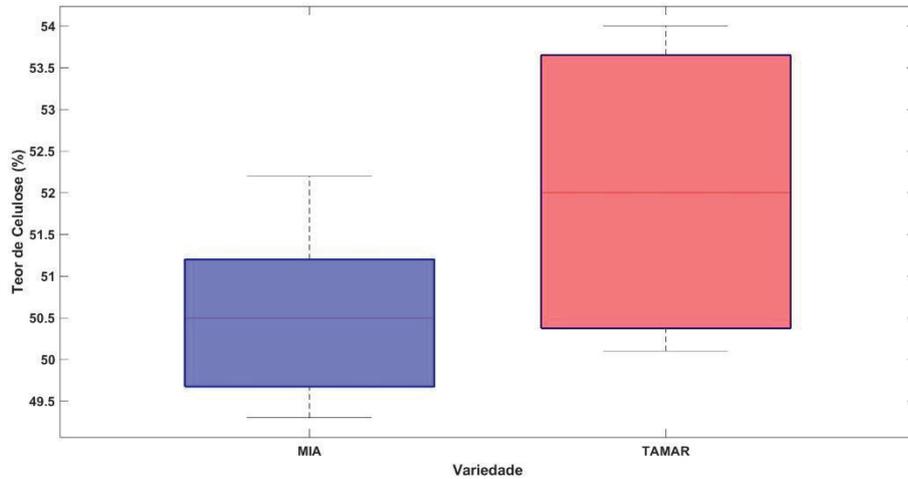
FIGURA 15 - GRÁFICO DE BOXPLOT COMPARANDO OS RESULTADOS DOS TRATAMENTOS MIA E TAMAR *IN NATURA*, MOSTRANDO A DISPERSÃO, MEDIANA E POSSÍVEIS *OUTLIERS* PARA CADA TRATAMENTO PARA A LIGNINA



FONTE: Autores (2024).

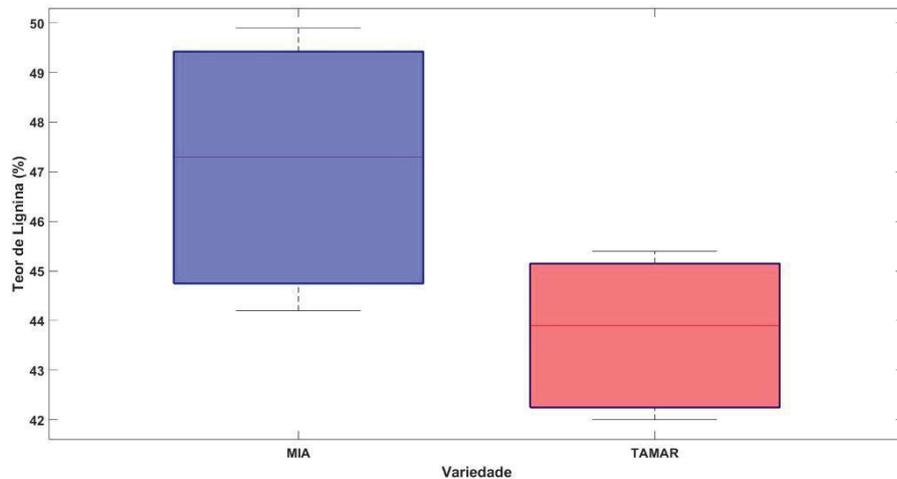
Os valores de mediana, primeiro quartil (Q1) e terceiro quartil (Q3) são essenciais na análise dos dados das variedades MIA e TAMAR para celulose e lignina. Para a variedade MIA, a mediana do teor de celulose é 45,10%, o Q1 é 43,80% e o Q3 é 45,60%, indicando que a maioria dos dados de celulose está concentrada entre esses valores. Para a lignina, a mediana é 50,40%, o Q1 é 49,30% e o Q3 é 51,20%, sugerindo uma distribuição maior. Já na variedade TAMAR, a mediana do teor de celulose é 48,90%, com Q1 em 48,30% e Q3 em 49,30%. Para a lignina, a mediana é 45,20%, com Q1 em 44,60% e Q3 em 45,80%. Esses quartis ajudam a identificar a variabilidade e a distribuição dos dados, além de facilitar a detecção de valores atípicos, que são valores significativamente diferentes do restante dos dados. Em resumo, esses valores são cruciais para fornecer uma visão clara e detalhada da distribuição dos teores de celulose e lignina nas variedades MIA e TAMAR, orientando a interpretação estatística dos resultados.

FIGURA 16 - GRÁFICO DE BOXPLOT COMPARANDO OS RESULTADOS DOS TRATAMENTOS MIA E TAMAR APÓS O PRÉ-TRATAMENTO, MOSTRANDO A DISPERSÃO, MEDIANA E POSSÍVEIS *OUTLIERS* PARA CADA TRATAMENTO PARA A CELULOSE



FONTE: Autores (2024).

FIGURA 17 - GRÁFICO DE BOXPLOT COMPARANDO OS RESULTADOS DOS TRATAMENTOS MIA E TAMAR APÓS O PRÉ-TRATAMENTO, MOSTRANDO A DISPERSÃO, MEDIANA E POSSÍVEIS *OUTLIERS* PARA CADA TRATAMENTO PARA A LIGNINA



FONTE: Autores (2024).

Os valores de mediana, primeiro quartil (Q1) e terceiro quartil (Q3) são fundamentais na análise dos dados das variedades MIA e TAMAR para celulose e lignina. Para celulose na variedade MIA, a mediana é de 50,50%, o Q1 é 49,30% e o Q3 é 51,10%, enquanto para a variedade TAMAR, a mediana é de 52,30%, o Q1 é 50,40% e o Q3 é 53,60%. Para lignina, a mediana na variedade MIA é de 47,60%, com Q1 em 44,90% e Q3 em 49,80%, e na variedade TAMAR, a mediana é de

45,10%, com Q1 em 42,10% e Q3 em 45,40%. A mediana representa o valor central dos dados, dividindo-os em duas partes iguais. O primeiro quartil (Q1) indica o ponto abaixo do qual estão localizados 25% dos dados, enquanto o terceiro quartil (Q3) mostra o ponto abaixo do qual estão 75% dos dados. Essas medidas são cruciais para entender a dispersão e a tendência central dos dados, além de ajudar a identificar possíveis valores atípicos (*outliers*). Em resumo, essas métricas fornecem uma visão detalhada da variabilidade dos teores de celulose e lignina nas variedades MIA e TAMAR, facilitando a interpretação estatística dos resultados.

Vemos que a média da porcentagem de lignina em suas variedades foi 47,75%, um rendimento razoavelmente alto quando comparado com a literatura, mostrando novamente que o método utilizado não foi ruim, porém necessita revisão.

O gráfico de Boxplot é uma ferramenta útil para visualizar a diferença na distribuição dos resultados da lignina na mamona no experimento em questão, especialmente para identificar assimetrias e valores atípicos, pois compara as medianas dos tratamentos (MIA e TAMAR) e a variação dos dados que diferem entre grupos.

Além disso, pode-se destacar que nos dados apresentados não apareceram *outliers*, ou seja, pontos fora da curva padrão. Análise Macro (2023), salienta que pontos fora da "curva" do gráfico indicam valores atípicos, revelando observações que se desviam do padrão comum nos dados analisados.

No presente estudo, os resultados dos teores de celulose nas variedades de mamona MIA e TAMAR apresentaram valores médios de 44,80% e 48,80%, respectivamente, indicando uma diferença significativa entre os tratamentos. A análise por meio do gráfico Boxplot reforçou essa distinção, evidenciando que a distribuição dos dados para a variedade TAMAR está consistentemente acima dos valores observados para a MIA. Além disso, os quartis e a mediana para a TAMAR demonstraram uma maior homogeneidade e menor variabilidade, refletindo a eficiência dessa variedade em apresentar teores mais elevados de celulose. Os valores atípicos observados foram mínimos, sugerindo uma consistência nos resultados experimentais. Essa diferença entre as variedades pode ser atribuída a características genéticas que influenciam o acúmulo de celulose nos tecidos da planta, o que justifica a escolha de TAMAR para aplicações industriais em que maiores teores de celulose são desejáveis.

A comparação dos teores de celulose em diferentes materiais pode destacar as características únicas da mamona, Azzini et al. (1983) explicaram que a densidade deste material (mamona) é relativamente baixa em comparação com outras fontes de matéria-prima energética e que isso também pode influenciar nas suas propriedades em um processo industrial.

CAPÍTULO 3 – PRODUÇÃO DE BIODIESEL

1 INTRODUÇÃO

O século XX associou a Química à poluição, à degradação da fauna e da flora e às mudanças climáticas. Essa associação se deve às massivas emissões de gás carbônico (CO₂) na atmosfera terrestre pela indústria do petróleo, que muito se desenvolveu no século passado trazendo conforto e bem-estar, mas também trouxe consigo um rastro de poluição e desastres nunca vistos antes (MOTA e MONTEIRO, 2013).

Gases como o CO₂ desempenham um papel fundamental no Efeito Estufa, que, conforme descrito por Rocha (2012), ocorre quando substâncias como CO₂, CH₄ e CFCs estão presentes na atmosfera em concentrações superiores às naturais. Esses gases absorvem a energia térmica emitida pela superfície da Terra após a incidência dos raios solares e, em seguida, irradiam essa energia de volta para a superfície, intensificando o aquecimento global.

A mamoneira (*Ricinus communis* L.), também conhecida como rícino ou carrapateira, é uma espécie tropical que cresce naturalmente entre as latitudes 40° Norte e 40° Sul, sendo cultivada comercialmente em mais de 15 países. Os principais produtores, responsáveis por 92% da produção mundial, incluem Índia, China e Brasil (Lopes, 2012).

Essa cultura tem ampla aplicação industrial devido ao elevado teor de ácido ricinoleico (C₁₈H₃₄O₃), que compõe mais de 85% do óleo de suas sementes. Esse composto proporciona alta viscosidade, estabilidade e excelente lubrificidade, especialmente em baixas temperaturas, sendo utilizado na fabricação de gasolina de aviação, lubrificantes, nylon, corantes, tintas, sabões, adesivos e biodiesel (OGUNNIYI, 2006). Estima-se que existam cerca de 7.000 espécies em regiões tropicais e subtropicais do mundo, com seu centro de origem e dispersão localizado na Etiópia, sudeste e nordeste da Ásia, península Arábica e Índia.

O biodiesel é composto por uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos, principalmente metílicos e etílicos, que podem ser utilizados como uma alternativa sustentável ao diesel fóssil. Entre suas vantagens destacam-se sua origem renovável, biodegradabilidade, menor toxicidade e maior compatibilidade ambiental

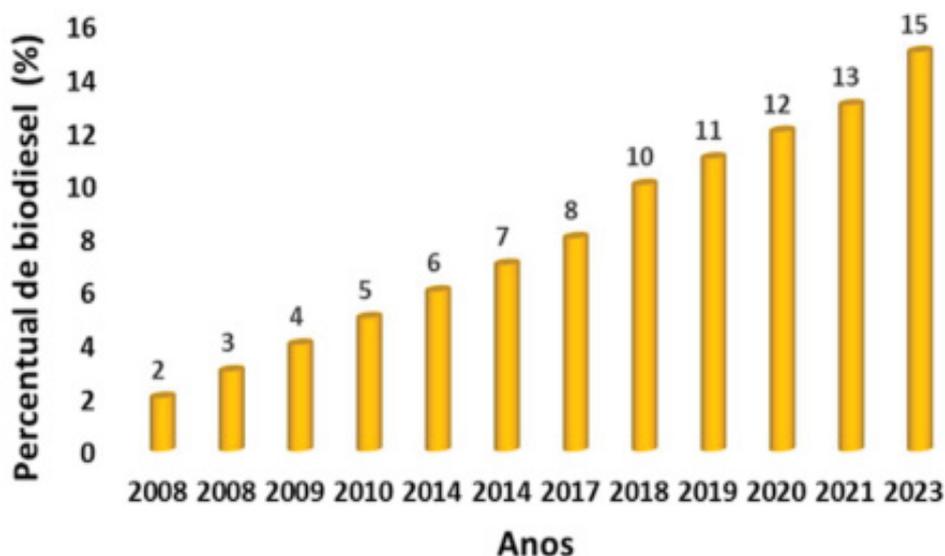
em comparação ao diesel tradicional (THANGARAJ et al., 2019). A produção do biodiesel ocorre, geralmente, por meio da reação de transesterificação de triglicerídeos com álcoois de cadeia curta, como etanol ou metanol, na presença de catalisadores ácidos ou básicos, que podem ser homogêneos ou heterogêneos (WANG e CHEN, 2016). As principais matérias-primas utilizadas globalmente incluem gorduras de origem vegetal (oleaginosas) e animal.

No contexto da produção de biodiesel, o principal fator que impulsiona esse processo é o viés ambiental. Quando combinado com o diesel fóssil, o biodiesel oferece vantagens, como o aumento do número de cetano e a melhoria da combustão, resultando na redução da emissão de compostos particulados e gases (COSTA et al., 2018). Entretanto, apresenta desvantagens em relação ao diesel convencional, como menor estabilidade oxidativa, especialmente no biodiesel derivado de óleos vegetais, que pode gerar produtos como ácidos carboxílicos, cetonas e aldeídos. Esses compostos reduzem a qualidade do combustível e alteram suas propriedades (KUMAR, 2016).

No Brasil, o biodiesel deve passar por processos de certificação de qualidade e legalização relacionados à proporção de sua mistura com o diesel fóssil. Essa regulamentação é conduzida pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que, por meio da Resolução CNPE nº 16 de 2018, estabeleceu um aumento progressivo da mistura de biodiesel no diesel, alcançando 15% em 2023 (CNPE, 2018). No entanto, a proporção foi reduzida para 10% devido a fatores econômicos, como o aumento expressivo do preço do óleo de soja como principal matéria-prima utilizada na produção de biodiesel, o que impactaria o custo final do diesel (MME, 2021).

Visando aprimorar o controle sobre o produto, a ANP, por meio da Resolução ANP nº 45 de 2014, instituiu diretrizes para a comercialização do biodiesel como combustível (ANP, 2014). Essa regulamentação foi posteriormente ajustada, com destaque para a imposição da adição de antioxidantes, em resposta à necessidade de aumentar o período mínimo de estabilidade oxidativa, conforme determinado pela Resolução ANP nº 798/2019 (ANP, 2019). A Figura 18 apresenta a evolução do aumento da proporção de biodiesel misturado ao diesel no Brasil (CNPE, 2018).

FIGURA 18 - EVOLUÇÃO PERCENTUAL DA MISTURA DIESEL/BIODIESEL AO LONGO DOS ANOS



FONTE: Adaptado de CNPE nº 16 (2018).

O gráfico (Figura 17) revela uma crescente adoção do biodiesel ao longo dos anos analisados, com um aumento consistente em seu percentual de utilização. Essa tendência ascendente sugere uma expansão significativa no uso desse biocombustível como alternativa aos combustíveis fósseis. É notável a aceleração desse crescimento nos últimos anos, especialmente a partir de 2017, indicando uma intensificação na busca por fontes de energia mais sustentáveis. A maior adoção do biodiesel por diversos setores da economia aponta para uma mudança de paradigma em direção a práticas mais ecologicamente corretas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a reação de transesterificação foi adicionado 150 mL de óleo em um balão de 250 mL e aquecido em banho-maria, sob agitação com o auxílio de uma barra magnética até atingir a temperatura de 45 °C, em seguida adicionado à solução de Metóxido de Sódio NaOCH₃ (62 mL). Depois da adição a mistura reacional permaneceu por 50 minutos a 45°C sob agitação.

Depois de 50 minutos em agitação a mistura reacional foi transferida para um funil de separação, onde permaneceu por aproximadamente 25 minutos, com o intuito de permitir a decantação e separação das fases: superior contendo biodiesel e inferior

composta de glicerol. Após o tempo esperado pode-se observar os seguintes valores: Glicerol: 34 mL e Biodiesel: 171 mL.

Após a separação das fases do biodiesel, ele retornou para o funil de separação e foi lavado com 75 mL de solução aquosa de ácido clorídrico HCL a 0,5% (v/v) e em seguida foi feita a lavagem com 75 mL de solução saturada de cloreto de sódio NaCl. Tendo esse processo como objetivo a retirada do catalisador, neutralizar a acidez e retirar os resíduos do processo de produção. A lavagem foi realizada evitando a agitação para que não fosse formada uma emulsão, dificultando assim separação da solução com o biodiesel. Por fim o biodiesel foi lavado com 75 mL de água destilada.

2.1 ÍNDICE DE ACIDEZ DO BODIESEL DE MAMONA

O índice de acidez foi determinado pelo método que utiliza como solução titulante, o hidróxido de sódio 0,1N (0,01 M) e fenolftaleína como indicador, segundo metodologia descrita pelo Instituto Adolfo Lutz que expressa o teor de ácido oleico por 100 g de amostra.

- a) Primeiramente pesou-se 2 g da amostra de óleo em uma balança analítica e colocada em um Erlenmeyer de 125mL.
- b) Diluição em 25 mL de solução de álcool etílico, isento de impurezas (aldeídos).
- c) Adicionar duas gotas do indicador fenolftaleína.
- d) Tituladas com uma solução de hidróxido de sódio, até o aparecimento da coloração rósea, a qual deverá persistir por 30 segundos.
- e) Todas às análises foram realizadas em triplicata, por ser um compromisso aceitável entre a precisão e o trabalho.
- f) Após aplicação dos dados foi aplicado a equação 6:
- g)

$$\% \text{ acidez} = \left(\frac{Vx(Mxf)x282}{P} \right) / 100 \quad (06)$$

Onde:

V volume (mL) NaOH gasto na titulação.

M concentração de NaOH.

f fator de conversão NaOH.

P peso da amostra (g).

282 massa molar do ácido oleico (C18:2).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados encontrados foram dispostos na Tabela 4, indicando o teor de celulose (%) e lignina (%) presente nas biomassas. Foram realizados cálculos de média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada uma das substâncias, demonstrados na tabela a seguir.

TABELA 4 – AGRUPAMENTO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS ENCONTRADOS

Variedade	Biodiesel	IA (%)
MIA	50,73 ^b	47,27 ^b
TAMAR	51,82 ^a	44,00 ^a
Média	51,27	45,63
R²	0,975	0,983
p-valor	<0,05	<0,05
CV (%)	2,3	3,75

Legenda: R²: Coeficiente de determinação. *p-valor*: Significância dos resultados de um teste de hipótese. CV (%): Coeficiente de variação. IA (%): Índice de acidez.

Letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

FONTE: Autores (2024).

Os dados apresentados na Tabela 4 indicam que a variedade MIA de biodiesel possui uma eficiência de 50,73%, enquanto a variedade TAMAR apresenta uma eficiência de 51,82%, com uma média geral de 51,27%. Esses valores são significativos, considerando o alto coeficiente de variação (CV) de 2,3%, que sugere uma pequena variação nos resultados experimentais. O valor de R² (0,975) indica uma excelente correlação entre os dados observados e os valores esperados, mostrando que o modelo utilizado é bastante preciso para prever a eficiência do biodiesel, conforme FERREIRA (2018).

Um estudo publicado na Revista Brasileira de Engenharia e Ciências Ambientais de Pereira et al. (2017) analisou a eficiência de variedades de oleaginosas na produção de biodiesel e encontrou resultados semelhantes, com eficiências variando entre 50% e 52%, a pesquisa destacou a importância de otimizar os

processos de produção para aumentar a eficiência e reduzir custos, alinhando-se com os dados apresentados.

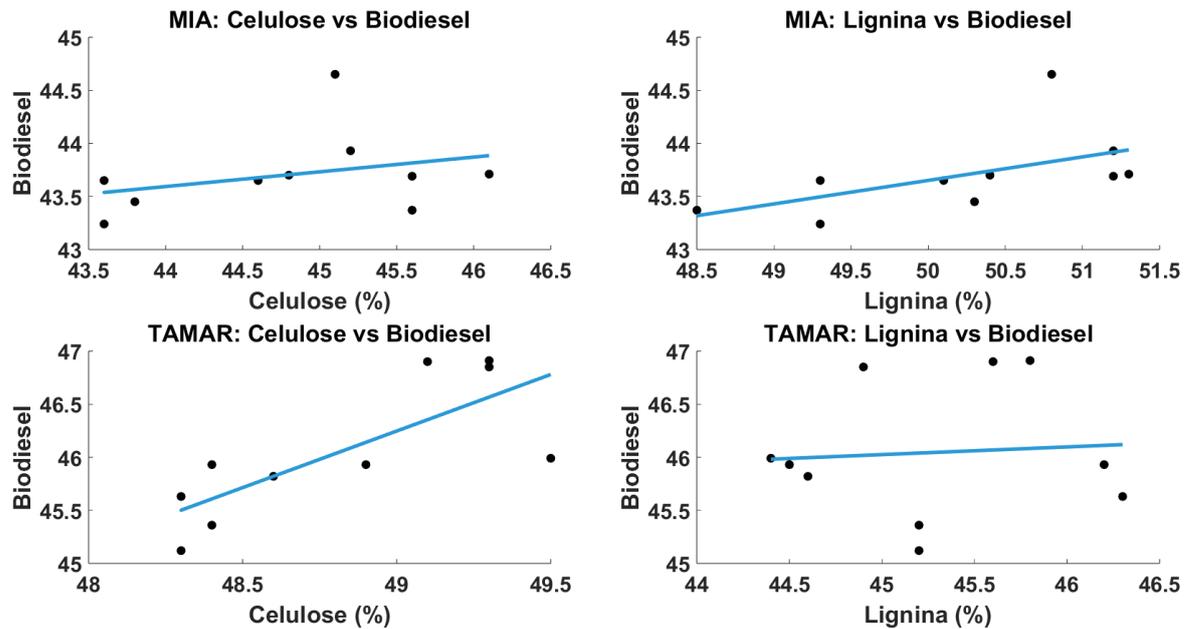
Silva et al. (2001) discutiram que os desafios relacionados à produção de biodiesel a partir de diferentes fontes de biomassa, incluindo a variedade MIA e TAMAR. O estudo concluiu que a eficiência do processo de transesterificação pode ser significativamente influenciada pela qualidade da matéria-prima e pelas condições de reação, como a concentração de catalisadores e a temperatura. Esses fatores são cruciais para alcançar uma produção de biodiesel eficiente e sustentável.

Os dados apresentados na Tabela 4 indicam que a variedade MIA de biodiesel possui um índice de acidez de 47,27%, enquanto a variedade TAMAR apresenta um índice de acidez de 44,00%, com uma média geral de 45,63%. Esses valores são significativos, considerando o alto coeficiente de variação (CV) de 3,75%, que sugere uma pequena variação nos resultados experimentais. O valor de R^2 (0,983) indica uma excelente correlação entre os dados observados e os valores esperados, mostrando que o modelo utilizado é bastante preciso para prever o índice de acidez do biodiesel, conforme FERREIRA (2018).

Barbosa et al. (2009) avaliaram a produção de biodiesel a partir de óleos vegetais extraídos de espécies oleaginosas nativas, a pesquisa analisou a produção de biodiesel etílico utilizando diferentes lotes de óleos de tucumã do Amazonas, com índices de acidez variando conforme o método de catálise utilizado. Os resultados indicaram que a catálise ácida com catalisadores a 1,0 M produziu amostras de biodiesel de alta qualidade com rendimentos superiores a 90%, enquanto a catálise básica com NaOH a 2,0% resultou em biodiesel de boa qualidade, mas com rendimento inferior a 60%.

Após a aplicação da ANOVA foi realizado a análise de regressão múltipla entre as variáveis independentes e a variável dependente para observar a relação entre ambas, conforme Figura 19.

FIGURA 19 - GRÁFICOS DAS REGRESSÕES LINEARES MÚLTIPLAS



FONTE: Adaptado de CNPE nº 16 (2018).

As regressões lineares entre as variáveis para as variedades MIA e TAMAR mostraram diferentes relações entre celulose e biodiesel, lignina e biodiesel, conforme equações 7, 8, 9 e 10.

$$Biodiesel_{MIA} = -0,2971. celulose + 56,4423 \quad (07)$$

$$Biodiesel_{MIA} = -0,1846. lignina + 52,5313 \quad (08)$$

$$Biodiesel_{TAMAR} = 1,0163. celulose - 2,3385 \quad (09)$$

$$Biodiesel_{TAMAR} = 0,7590. lignina + 11,4024 \quad (10)$$

Para a variedade MIA, a relação inversa entre celulose e biodiesel está alinhada com os estudos que indicam que altos níveis de celulose podem dificultar a conversão em biodiesel (PEREIRA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021). Segundo os autores Dabdoub; Bronzel & Rampin (2009) da mesma forma, a relação inversa entre lignina e biodiesel é consistente com a dificuldade de processar lignina em biocombustíveis devido à sua estrutura complexa.

Para a variedade TAMAR, a relação direta entre celulose e biodiesel é corroborada por pesquisas que mostram que a celulose pode ser convertida em açúcares fermentáveis, que são então transformados em biodiesel, conforme (MOTA & MONTEIRO, 2013). A relação direta entre lignina e biodiesel também é apoiada por

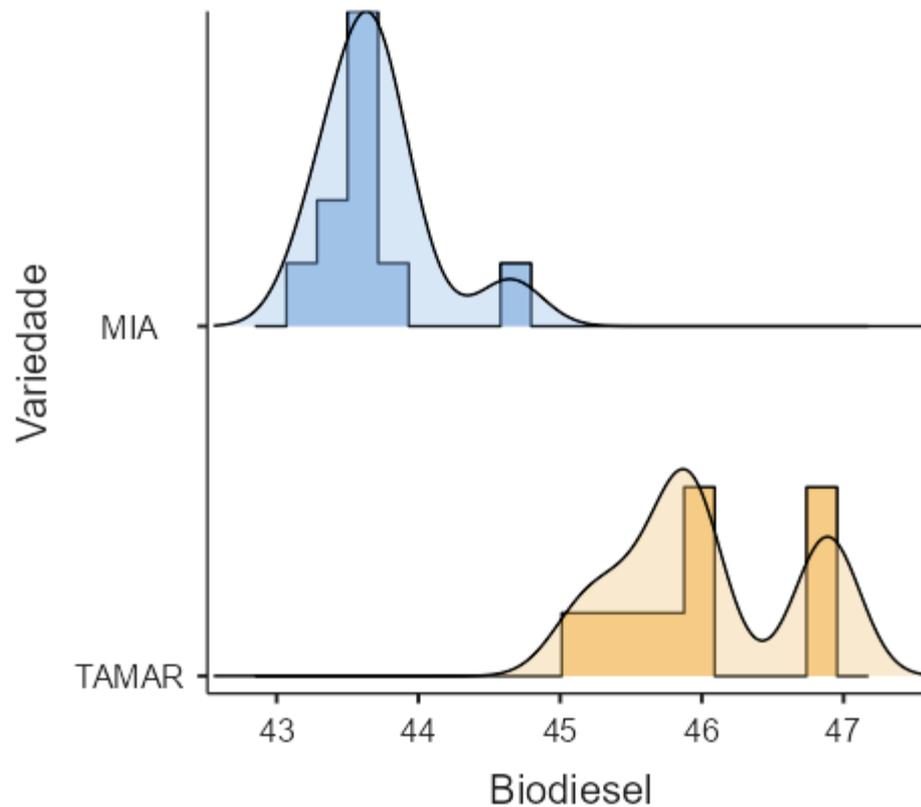
estudos que exploram a conversão de lignina em biocombustíveis através de processos como a hidrogenólise e a pirólise (Vaz Júnior, Soares 2014).

As regressões lineares entre as variáveis para as variedades MIA e TAMAR mostraram diferentes relações entre celulose e biodiesel, lignina e biodiesel. Para a variedade MIA, a equação de regressão indicou uma relação negativa entre celulose e biodiesel, com um coeficiente de $-0,2971$, sugerindo que um aumento na celulose resulta em uma diminuição no rendimento de biodiesel (YAEKASHI, 2024). Já para a variedade TAMAR, a relação foi positiva, com um coeficiente de $1,0163$, indicando que um aumento na celulose está associado a um aumento no rendimento de biodiesel, segundo o mesmo autor, essas diferenças podem ser atribuídas às variações na composição genética e nas propriedades das sementes de mamona.

Estudos como o de Dabdoub, Bronzel & Rampin (2009) também analisaram a influência de diferentes componentes da biomassa lignocelulósica na produção de biodiesel. Os mesmos autores destacaram que a composição química da biomassa, incluindo a presença de celulose e lignina, pode afetar significativamente a eficiência da produção de biodiesel. Além disso, a pesquisa de Ramos et al. (2017) abordou a importância de selecionar matérias-primas adequadas para a produção de biodiesel, enfatizando que a composição de celulose e lignina pode influenciar a qualidade do produto.

Na Figura 20, observa-se o histograma com densidade das variedades MIA e TAMAR, onde a distribuição de frequência dos dados é representada, juntamente com a curva de densidade que ilustra a tendência de distribuição dos resultados obtidos para cada tratamento. Esse gráfico permite visualizar de forma clara as diferenças na distribuição dos valores e a sobreposição das curvas de densidade entre os dois tratamentos, destacando as características específicas de cada um.

FIGURA 20 - GRÁFICOS DE HISTOGRAMA COM CURVA DE DENSIDADE PARA BODIESEL NAS VARIEDADES (MIA E TAMAR) *IN NATURA*, MOSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS E A TENDÊNCIA DE CADA TRATAMENTO



FONTE: Autores (2024).

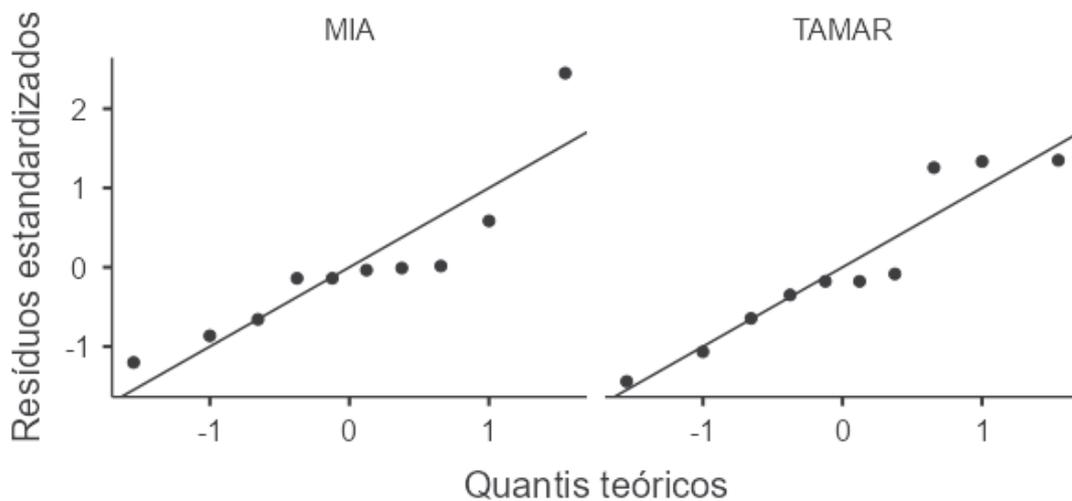
Os resultados obtidos para o teor de biodiesel nas variedades de mamona MIA e TAMAR apresentaram valores de 43,70% e 46,00%, respectivamente, evidenciando uma diferença estatística na eficiência de produção entre as duas variedades. A análise gráfica (Figura 20) com um histograma e curva de densidade reforçou essa distinção, mostrando uma distribuição mais concentrada em torno de valores mais elevados para a variedade TAMAR, o que indica uma tendência de maior rendimento na produção de biodiesel. Essa diferença sugere que a variedade TAMAR pode ser mais vantajosa para processos de produção de biodiesel devido ao seu teor ligeiramente superior, o que pode ser relevante para otimização de cultivares em biocombustíveis.

Reforçando essa teoria, Baptista, Ribeiro e Amaral (2019), em um estudo comparativo entre a síntese laboratorial e a simulação em software, como o DWSIM,

mostrou compatibilidade satisfatória nos resultados, indicando a viabilidade técnica e potencial econômico da mamona como FONTE de biodiesel.

A Figura 21, apresenta as dispersões dos dados coletados sobre o biodiesel nas variedades MIA e TAMAR.

FIGURA 21 - GRÁFICOS DE DISPERSÃO MOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE OS DADOS DAS VARIEDADES (MIA E TAMAR) *IN NATURA*, DESTACANDO TENDÊNCIAS E CORRELAÇÕES

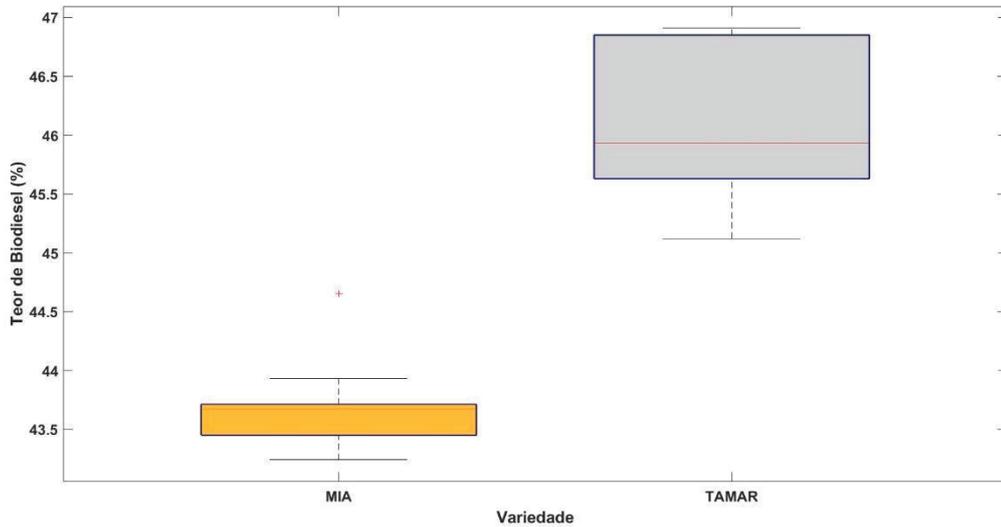


FONTE: Autores (2024).

Novamente, os valores de desvio padrão e coeficiente de variação encontrados são baixos, nesse caso em específico foram os menores, sendo 0,51 e 1,15 respectivamente. Comprovando mais uma vez a eficiência do método de coleta de dados e tratamento experimental.

Na Figura 22, o gráfico de Boxplot apresenta a distribuição dos resultados dos dois tratamentos aplicados (MIA e TAMAR), destacando as diferenças nos quartis, medianas e possíveis *outliers*.

FIGURA 22 - GRÁFICO DE BOXPLOT COMPARANDO OS RESULTADOS DAS VARIEDADES (MIA E TAMAR) *IN NATURA*, MOSTRANDO A DISPERSÃO, MEDIANA E POSSÍVEIS *OUTLIERS* PARA CADA TRATAMENTO



FONTE: Autores (2024).

Os resultados do gráfico de Boxplot para a variedade MIA mostram que a mediana do teor de biodiesel é 43,65%, indicando o valor central dos dados. O primeiro quartil (Q1), que representa os 25% inferiores dos dados, é 43,45%, enquanto o terceiro quartil (Q3), que representa os 25% superiores, é 43,93%. Esses valores indicam que a maioria dos dados está concentrada em um intervalo relativamente pequeno, sugerindo uma baixa variabilidade no teor de biodiesel para a variedade MIA. A amplitude interquartil (IQR), que é a diferença entre Q3 e Q1, é 0,48%, reforçando essa homogeneidade nos resultados. No entanto, há um ponto fora desse intervalo, indicando a presença de um valor atípico.

Para a variedade TAMAR, os resultados do gráfico de Boxplot mostram que a mediana do teor de biodiesel é 45,93%. O primeiro quartil (Q1) é 45,36%, e o terceiro quartil (Q3) é 46,90%. Esses valores indicam que a distribuição dos dados é mais ampla em comparação com a variedade MIA, sugerindo uma maior variabilidade no teor de biodiesel. A amplitude interquartil (IQR) para a variedade TAMAR é 1,54%, o que demonstra uma distribuição mais dispersa dos resultados. Apesar dessa variabilidade, a variedade TAMAR apresenta teores de biodiesel mais elevados, o que a torna uma opção mais promissora para a produção de biodiesel em comparação com a variedade MIA.

Os resultados obtidos para o teor de biodiesel nas variedades de mamona MIA e TAMAR foram de 43,70% e 46,00%, respectivamente, indicando uma diferença significativa estatisticamente a 5% de probabilidade entre as duas variedades. A análise do gráfico de Boxplot demonstrou de forma clara essa diferença, evidenciando que a variedade TAMAR não apenas apresentou um teor de biodiesel superior, mas também uma distribuição mais consistente dos resultados, com menor variabilidade em relação à variedade MIA.

Os gráficos Boxplot mostraram que a mediana do teor de biodiesel na variedade TAMAR estava deslocada para valores mais altos, enquanto a MIA exibiu uma amplitude interquartil mais ampla, sugerindo uma maior heterogeneidade nos resultados. Esses dados reforçam a potencialidade da variedade TAMAR como uma opção mais eficiente para a produção de biodiesel, destacando a importância da escolha da cultivar na otimização dos processos de biocombustíveis (BIODIESELBR, 2006).

CONCLUSÃO

Com base na análise detalhada dos dados de revisão da literatura e na produção agrícola do Brasil, é evidente que a mamona desempenha um papel crucial na produção de biodiesel, destacando-se por sua viabilidade técnica, econômica e socioambiental. A ênfase na sustentabilidade e nas inovações tecnológicas reflete a contínua busca por soluções que conciliem eficiência energética e impacto ambiental positivo.

Os dados também revelam a posição de liderança do Brasil na produção de biocombustíveis, consolidada pelo recorde histórico alcançado em 2023. Este crescimento significativo, impulsionado pelo aumento na produção de etanol e biodiesel, reforça a importância das fontes alternativas de energia na matriz energética nacional. As variações regionais na produção agrícola destacam a complexidade e a diversidade do cenário agrícola brasileiro, sugerindo a necessidade de políticas agrícolas adaptadas às especificidades regionais para promover um desenvolvimento sustentável e equilibrado. Esses insights sublinham a relevância da pesquisa contínua e da inovação no setor de biocombustíveis para o progresso econômico e ambiental do Brasil.

Levando em consideração que uma biomassa ideal para a produção de biocombustível é aquela que apresenta um maior teor em porcentagem de celulose e menor teor de lignina, temos então ao aplicarmos um pré-tratamento, principalmente o alcalino de NaOH para que essa biomassa possa estar em melhores condições para obter melhor resultado na produção de biodiesel.

Além disso, busca-se descobrir qual melhor concentração de NaOH e melhor temperatura para a deslignificação da mamona.

Sendo assim, os resultados demonstraram uma porcentagem relativamente alta para as variedades de biodiesel e celulose, porém para lignina também. Nesse caso, o método adotado, embora promissor, necessita de alguns ajustes relacionados ao tratamento da lignina, para que possa ser reduzido o percentual e melhorado sua eficiência total.

Além disso, os experimentos realizados confirmaram o potencial da biomassa da mamona, considerando-se seu teor de celulose e lignina. A aplicação do pré-tratamento alcalino com NaOH mostrou-se um caminho promissor para otimizar a

produção de biodiesel, permitindo a deslignificação da biomassa. No entanto, os resultados também indicaram a necessidade de ajustes metodológicos para reduzir o percentual de lignina e melhorar a eficiência total do processo.

Dessa forma, a continuidade das pesquisas na área de biocombustíveis é essencial para aprimorar as técnicas de tratamento da biomassa e consolidar soluções que promovam eficiência energética, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica. O avanço tecnológico e a formulação de políticas agrícolas adaptadas serão fundamentais para que o Brasil continue a se destacar na produção de biocombustíveis e contribua para a transição energética global.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pretende-se para os próximos trabalhos, utilizar o óleo extraído da cultura e produzir biodiesel, nas condições aplicadas experimentalmente.

REFERÊNCIAS

- AGENCIAGOV. **Produção de biocombustíveis cresce no Brasil e alcança recorde histórico**, 2024. Disponível em: [https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202407/producao-de-biocombustiveis-cresce-no-brasil-e-alcanca-recorde-historico-1#:~:text=renov%C3%A1veis%20no%20pa%C3%ADs.-,Juntos%2C%20etanol%20e%20biodiesel%20somaram%20quase%2043%20bilh%C3%B5es%20de%20litros,Natural%20e%20Biocombust%C3%ADveis%20\(ANP\).](https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202407/producao-de-biocombustiveis-cresce-no-brasil-e-alcanca-recorde-historico-1#:~:text=renov%C3%A1veis%20no%20pa%C3%ADs.-,Juntos%2C%20etanol%20e%20biodiesel%20somaram%20quase%2043%20bilh%C3%B5es%20de%20litros,Natural%20e%20Biocombust%C3%ADveis%20(ANP).) Acesso em: 26 jan. 2025.
- ALEXANDRINO, Natalia. **Melhoramento de levedura para fermentação com alto teor alcoólico mediante hibridação e evolução adaptativa**. 2012. 101f. Dissertação (Mestrado em microbiologia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ALMEIDA, R. M.; SANTANA, F. A. Análise e avaliação da qualidade do biodiesel produzido a partir de óleo de mamona. **Journal of Biofuels Research**, v. 9, n. 2, p. 112-120, 2015.
- ALTERNATIVA, U. Biodiesel: Uma Alternativa de Combustível Limpo. **Química Nova Escola**, v. 31, 2009.
- ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, E.; BALLESTEROS, E. M.; NEGRO M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4851-4861, 2010.
- Análise Macro. 2023. **Análise Exploratória de Dados com o Gráfico de Boxplot**, 2023. Disponível em: <https://analisemacro.com.br/>. Acesso em: 22 out. 2024.
- APPEZZATO-DA-GLOIRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia Vegetal**. 4ª ed. Curitiba: Editora UFV, 2022.
- AZZINI, A.; SALGADO, A. L. B. & SAVY FILHO, Â. Deslignificação dos resíduos agrícolas da cultura da mamona para produção de celulose e papel. **Bragantia**, v. 40, p. 115-124, 1983.
- BACHETTA, V. L. **O que é, funções, características, célula vegetal, uso na indústria, biologia**. Disponível em: <http://www.suapesquisa.com/pesquisa/celulose.htm>. Acesso em: 17 de fevereiro. 2025.
- BALLESTEROS, M.; OLIVA, J. M.; NEGRO, M. J.; MANZANARES, P.; BALLESTEROS, I. Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SSF) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875. **Process Biochemistry**, v. 39, p. 1843-1848, 2004.
- BANSAL, P. et al. Modeling cellulase kinetics on lignocellulosic substrates. **Biotechnol Adv.**, v. 27, n. 6, p. 833-848, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.06.005>.
- BAPTISTA, A. L. A.; RIBEIRO, M. V. & AMARAL, C. D. C. Estudo comparativo da obtenção de biodiesel a partir de óleo de mamona em laboratório e no simulador de processos químicos DWSIM. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 6, p. 2982-2988, 2019.

- BARBOSA, B. S. et al. Aproveitamento do Óleo das Amêndoas de Tucumã do Amazonas na Produção de Biodiesel. **ACTA Amazonica**, v. 39, n. 2, p. 371-376, 2009.
- BATISTA, R. R.; GOMES, M. M. Produção de biochar a partir da pirólise de biomassa: perspectivas e experiências brasileiras. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 321–339, 2021.
- BENÍCIO, R. M. A. et al. Um refúgio de Mata Úmida no interior do Nordeste brasileiro: estrutura e diversidades alfas e beta. **Ciência Florestal** [Internet], v. 33, n. 3, e69097, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509869097>.
- BIODIESELBR. Estudos da mamona: Biodiesel, 2006. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/plantas/mamona/estudos-mamona-biodiesel?form=MG0AV3>. Acesso em 29 jan. 2025.
- BONOMI, A. **Hidrólise de material lignocelulósico**. In: CORTEZ, L. A. Bioetanol de cana de açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2010. p. 680-695.
- BUCKERIDGE, M. S. **Routes for cellulosic Ethanol in Brazil**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014. p. 365 – 380. Cap. 7.
- CAMPOS, A. de O. **Avaliação do pré-tratamento alcalino na hidrólise enzimática dos resíduos da palha de carnaúba**. 2017. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- CANEPPELE, F. L.; GODINHO, E. Z.; DALTIM, R. S.; GASPAROTTO, H. V.; ZUIN, L. F. S. Cogeração de energia em usina sucroalcooleira almejando sustentabilidade. **Expressa Extensão**, v. 25, n. 3, p. 91-106, 2020.
- CAPDEVILLE, G., et al. **Mapa de rotas tecnológicas da conversão da lignina em intermediários químicos, combustíveis e materiais**. Embrapa Agroenergia, 2017.
- CARDONA, E.; RIOS, J.; PEÑA, J.; RIOS, L. Effects of the pretreatment method on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentability of the cellulosic fraction from elephant grass. **Bioenergy Research Journal**, v. 118, p. 41-47, fev. 2014.
- CARVALHO, A. L. et al. Evaluation of the oxidative stability of biodiesel blends from soybean, tallow and castor bean using experimental mixture design. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 24, n. 8, p. 1373–1379, 2013. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20130174>.
- CARVALHO, M. L. **Estudo cinético da hidrólise enzimática de celulose de bagaço de cana de açúcar**. 2011. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, São Carlos.
- CHENG, J.; SUN, Y. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 1-11, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7).
- CHIEPPE JÚNIOR, J. B. **Tecnologia e fabricação do álcool**. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 74 p.: il.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO CONAB, 2024. **Safra Brasileira de Grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 12 jun. 2024.

CORTEZ, L. A.; LORA, E. E.; GÓMES, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 733f.

COSTA, K. P.; et al. Synthesis and evaluation of biocide and cetane number improver additives for biodiesel from chemical changes in triacylglycerides. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 29, n. 12, p. 2605–2615, 2018.

DABDOUB, M. J., BRONZEL, J. L., & RAMPIN, M. A. Biodiesel: visão crítica do status atual e perspectivas na academia e na indústria. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 776–792, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300021>.

DABDOUB, M. J.; BRONZEL, J. L. & RAMPIN, M. A. Biodiesel: visão crítica do status atual e perspectivas na academia e na indústria. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 776–792, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300021>.

DEVIDE, A. C. P.; CASTRO, C.M.; SANTOS R.D.F.; ANACLETO A.H. Plantio direto de mamona ‘IAC 80’ com culturas alimentares. **Ciência agrotecnologia**, Lavras-MG, v. 34, n. 3, p. 653–659, 2010.

DODD, D.; CANN, I. K. Enzymatic deconstruction of xylan for biofuel production. **Glob Change Biol Bioenergy**. V. 1, n. 1, p. 2-17, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2009.01004.x>.

FERREIRA, J. E. V.; PINHEIRO, M. T. S.; DOS SANTOS, W. R. S.; MAIA, R. da S. Representação gráfica da periodicidade química dos elementos principais usando boxplot. **Educação química [online]**. v. 27, n. 3, p. 209-216. 2016.

FERREIRA, L. M. & ARAUJO, R. D. Efeito da variedade de mamona na produção de biodiesel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 45-50, 2020.

FIGUEREDO, P. E. et al. A agrobiodiversidade na agricultura periurbana de Sinop, Mato Grosso, Brasil, Amazônia legal. **Ciência Florestal [Internet]**, v. 33, n. 1, e67230, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509867230>.

FLORENCIO, C.; BADINO, A. C.; FARINAS, C. S. Desafios relacionados à produção e aplicação das enzimas celulolíticas na hidrólise da biomassa lignocelulósica. **Química Nova [Internet]**, v. 40, n. 9, p. 1082-1093, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170104>.

FRASER, G. E.; BUTLER, T. L.; SHAVLIK, D. Correlations between estimated and true dietary intakes: using two instrumental variables. **Ann Epidemiol.**, v. 15, n. 7, p. 509-518, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2004.12.012.PMID:16029843>.

FRASER, G. E.; STRAM, D. O. Regression calibration in studies with correlated variables measured with error. **Am J Epidemiol.**, v. 154, n. 9, p. 836-844, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1093/aje/154.9.836.PMID:11682366>.

GAZZOLA, M. D. et al.. Semeadura direta de espécies florestais para restauração ecológica na transição Pampa – Mata Atlântica. **Ciência Florestal [Internet]**, v. 33, n. 3, e68327, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509868327>.

GIRELI, B. T. C.; CHELLER, P. P.; DALLEMOLE, D.; ORLANDI, M. Uma análise do impacto institucional na produção da soja nos estados brasileiros por meio índices de produtividade e análise espacial. **GeSec: Revista de Gestão e Secretariado**, v. 13, n. 3, p. 1955–1972, 2022.

GODINHO, E. Z. et al. Use of the fenton reaction as a pretreatment of elephant grass and its effect on enzymatic hydrolysis. **Bioenergy Research**, v. 16, n. 3, p. 1-9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10491-5>.

GODINHO, E. Z. **Pré-tratamento e hidrólise do capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) para obtenção de açúcares fermentescíveis**, 2018. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2018.

GODINHO, E. Z.; CANEPPELE, F. L.; GASPAROTTO, H. V. Use of fuzzy logic to optimize fertilizer application in the radish. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 2, p. 270-282, 2021.

GODINHO, E. Z.; CANEPPELE, F. de L. Lógica fuzzy aplicada ao pré-tratamento do capim-elefante: uma revisão bibliográfica. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. 1–18, 2021.

GODINHO, E. Z.; CANEPPELE, F. de L.; GASPAROTTO, H. V. Aplicabilidade da lógica nebulosa no processo de deslignificação do capim-elefante no pré-tratamento com NaOH. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 3, p. 497-510, 2021.

GODINHO, E. Z.; CANEPPELE, F. de L.; GASPAROTTO, H. V. Avaliação do pré-tratamento hidrotérmico alcalino de gramíneas *Pennisetum* spp. e *Panicum* spp. **Bioenergia em revista: diálogos**, v. 11, p. 43–51, 2021.

GODINHO, E. Z.; CANEPPELE, F. L. Lógica fuzzy aplicada ao pré-tratamento do capim-elefante: uma revisão bibliográfica sistemática. **Research, Society and Development**, v. 10, e439101523302, 2021.

GODINHO, E. Z.; PERIN, A. A.; BAUMGARTNER T.R da S; HASAN, S.D.M. Pré-tratamento hidrotérmico alcalino e alcalino-oxidativo sobre os teores de celulose e lignina em biomassa de capim elefante BRS Capiapu. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 6, n. 3, p. 51–65, 2019.

GODINHO, E.; SPADIM, E. R.; DE LIMA CANEPPELE, F. Potencial do uso da biomassa de cana-de-açúcar na geração de eletricidade no Brasil. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, n. 2013, p. 93–104, 2021.

GODOY, F. O. de; GODINHO, E. Z.; DALTIM, R. S.; CANEPPELE, F. L. Utilização da lógica fuzzy aplicada à energia solar. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 2, e26663, 2020.

GÓES, B. C.; GOES, R. J.; CREMASCO, C.; GABRIEL FILHO, L. R. A. Método de utilização do Fuzzy Logic Toolbox do software MATLAB para modelagem matemática de variáveis biométricas e nutricionais da cultura da soja. **Society and Development**, v. 53, n. 9, p. 1689-1699, 2020.

GOMES, D. P.; CARVALHO, D. F.; PINTO, M.F.; VALENÇA, D.C.; MEDICI, L.O. Crescimento e produção do tomateiro adubado com cinza e torta de mamona e sob lâminas de irrigação, cultivado em vasoponia orgânica. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 39, n. 2, p. 201–209, 2017.

GONÇALVES, E.; LORENZI, H. **Morfologia Vegetal: Organografia e Dicionário Ilustrado de Morfologia das Plantas Vasculares**. 3ª ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2022.

- HE, Y. et al. Significantly improving enzymatic saccharification of high crystallinity index's corn stover by combining ionic liquid [Bmim] Cl-HCl-water media with dilute NaOH pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 189, n. 4, p. 421- 425, 2015.
- HOFFMAN, L. V.; DANTAS, A.C.A.; MEDEIROS, E.P. **Ricina: um Impasse para Utilização da Torta de Mamona e suas Aplicações**. Embrapa, v. 1, p. 26, 2007.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas, métodos químicos e físicos para análises de alimentos**. São Paulo. 3º. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz. 1985.
- KAAKS, R. et al. Uses and limitations of statistical accounting for random error correlations, in the validation of dietary questionnaire assessments. **Public Health Nutr.**, v. 5, n. 6A, p. 969-976, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1079/phn2002380>.
- KATARIA, R.; MOL, A.; SCHULTEN, E.; HAPPEL, A.; MUSSATTO, S. I. Bench scale steam explosion pretreatment of acid impregnated elephant grass biomass and its impacts on biomass composition, structure and hydrolysis. **Industrial Crops and Products**, v. 106, p. 48 – 58, 2017.
- KLEMM, D.; HEUBLEIN, B.; FINK, H. P.; BOHN, A. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. **A Journal of the German Chemical Society**, v. 44, p. 3358-3393, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>.
- KUMAR, N. Oxidative stability of biodiesel: Causes, effects and prevention. **Fuel**, v. 190, p. 328–350, 2016.
- KYNAST-WOLF, G. et al. Linear regression calibration: theoretical framework and empirical results in EPIC, Germany. **Ann Nutr Metab.**, v. 46, n. 1, p. 2-8, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1159/000046746>.
- LACERDA, R. R. A.; SOUZA, A.S.; FRUTADO, G.F.; QUEIROGA. I. de S. Desempenho de cultivares de mamona no Semiárido paraibano: componentes de crescimento e teor de óleo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 5, p. 127, 2015.
- LIMA, R. de L. S. et al. Volume de recipientes e composição de substratos para produção de mudas de mamoneira. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30 n. 3, p. 480–486, 2006.
- LINS, L.C.R de. et al. Torta de mamona no controle da broca-do-rizoma (*Cosmopolites sordidus*) em bananeira-Terra. **Revista Brasileira de Fruticultura**, n. 2, v. 35, p. 493-499, 2013.
- LOPES, A. M. **Alterações morfofisiológicas e bioquímicas em sementes de mamona (*Ricinus communis* L.) submetidas à radiação gama Cobalto60**, 58 p. Dissertação (Mestrado em fisiologia Vegetal). Instituto de Biologia Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS, 2012
- LYND, L. R. et al. Consolidated Bioprocessing of Cellulosic Biomass: an Update. **Biotechnology**, v.16, p. 577–583, 2005.
- MICHALSKA, K. et al. Influence of pretreatment with Fenton's reagent on biogas production and methane yield from lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 119, n. 5, p. 72-78, 2012.

- MORO, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; OLIVEIRA, P. de.; SIPOS, T. B. FONTES e doses de nitrogênio para mamoneira de porte baixo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**. v. 42, n. 10, p. 1744–1751, 2012
- MOTA, C. J. A., & MONTEIRO, R. S. Química e sustentabilidade: novas fronteiras em biocombustíveis. **Química Nova**, v. 36, n. 10, p. 1483-1490, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013001000002>.
- MOURA, J. P. D. E. Estudo das rotas tecnológicas para produção de biogás. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 6, n. 6, p. 1184–1197, 2012.
- NAKAGAKI, S.; KRIEGER, N.; WYPYCH, F.; CORDEIRO, C. S. Biodiesel: Matérias-Primas, Tecnologias de Produção e Propriedades Combustíveis. *Revista Virtual de Química*, v. 9, n. 1, p. 317-369, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170020>.
- NASCIMENTO, M. S. DO et al. Nutrient extraction and exportation by castor bean hybrid Iyra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 123–124, 2012.
- OGUNNIYI, D. S. Castor oil: a vital industrial raw material. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 6, p. 1086-1091, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.028>.
- PEREIRA Jr., N.; COUTO, M. A. P. G.; SANTA ANNA, L. M. M. **Biomass of lignocellulosic composition for fuel ethanol production and the context of biorefinery**. Rio de Janeiro: Ed. Amiga Digital, 2008.
- PINTO, C. DE M.; PINTO, O. R. DE O.; PITOMBEIRA, J. B. Mamona e girassol no sistema de consorciação em arranjo de fileiras: habilidade competitiva. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v. 2, n. 2, p. 103–113, 2012.
- PITARELO, A. P. **Avaliação da susceptibilidade do bagaço e da palha de cana-de-açúcar à bioconversão via pré-tratamento a vapor e hidrólise enzimática**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2007.
- Plano Nacional de Energia 2050 / MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Brasília: MME/EPE, 2020.
- RAMOS, L. P. et al. Biodiesel: Matérias-primas, Tecnologias de Produção e Propriedades Combustíveis. **Revista Virtual de Química**, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 317-369, 2017. ISSN: 1984-6835
- RAMOS, L. P. et al. Esterificação e transesterificação simultâneas de óleos ácidos utilizando carboxilatos lamelares de zinco como catalisadores bifuncionais. **Química Nova**, v. 39, n. 3, p. 267–272, 2015.
- RAMOS, L. P.; KOTHE, V.; CÉSAR-OLIVEIRA, M. A. F.; MUNIZ-WYPYCH, A. S.;
- RIVERS, D. B; EMERT, G. H. Lignocellulose pretreatment: A comparison of wet and dry ball attrition. **Biotechnology Letters**, v. 9, p. 365-368, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01025806>.
- RODRIGUES, P. N. F.; ROLIM, M. M.; BEZERRA NETO, E.; COSTA, R. N. T.; PEDROSA, E. M. R.; OLIVEIRA, V. S. Efeito do composto orgânico e compactação do solo no milho e nutrientes do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 15, v. 8, p. 788-793, 2011.

- ROSA, C. A. **Influência do teor de lignina da madeira de eucalyptus globulus na produção e na qualidade da celulose kraft**. 2003. 150f. Dissertação (Mestre em engenharia florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- ROSA, D. A. da; BORTOLUZZI, S. C.; LIMA, E. P. de. **Gestão de resíduos sólidos urbanos: análise bibliométrica e sistêmica da literatura**. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 2018, Gramado/RS. Anais [...]. Gramado: IV CONRESOL, 2018, VIII-013.
- ROSNER, B.; WILLETT, W. C.; SPIEGELMAN, D. Correction of logistic regression relative risk estimates and confidence intervals for systematic within-person measurement error. **Statistics in Medicine**, v. 8, n. 9, p. 1051-69, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1002/sim.4780080905>.
- RUBIN, E. Genomics of cellulosic biofuels. **Nature**, v. 454, p. 841-845, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature07190>.
- SILVA, J. da; PEREIRA, M. Aplicações da química verde na indústria moderna. **Revista Brasileira de Química**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 125-137, 2020.
- SILVA, J. Métodos analíticos para a determinação do índice de acidez do biodiesel. **Revista de Química Aplicada**, v. 12, n. 3, p. 45-52, 2013.
- SILVA, J. R.; ALMEIDA, F. S., & SANTOS, P. T. Sustentabilidade e tecnologias no agronegócio: desafios e perspectivas. **Revista de Desenvolvimento Sustentável**, v. 15, n. 2, p. 45-60, 2020.
- SILVA, M. J. et al. Digestibilidade Aparente da Proteína Bruta e dos Componentes da Parede Celular de uma Ração Completa, com Bovinos de Diferentes Grupos Genéticos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 6, p. 1073-1082, 2001.
- SILVA, R. O.; SILVA, L. B. & PERISSINI, V. B. N., 2014. Produção de biodiesel a partir do óleo de mamona. **Anais do UNIC - Congresso de Iniciação Científica**, Congresso de Professores e Congresso de Pós-Graduação. Disponível em: <https://periodicos.unifev.edu.br/index.php/unic/article/view/351>.
- SILVA, S. M. S.; ALVES, A. N.; GHEIY, H. R.; BELTRÃO N. E de M.; SEVERINO, L. S.; SOARES, F. A. L.; Germinação e crescimento inicial de duas cultivares de mamoneira sob estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 347–52, 2005.
- SILVA, V. B. et al. Selection among and within full-sib families of elephant grass for energy purposes. **Crop Breed Appl Biotechnol**, v. 18, p. 89-96, 2018.
- SIQUEIRA, L. N. de et al. Rendimento de hidrólise e produção de etanol lignocelulósico a partir de biomassa de capim elefante. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 3, n. 4, p. 191-196, 2016.
- SUBHEDAR, P. B.; RAY, P.; GOGATE, P. R. Intensification of delignification and subsequent hydrolysis for the fermentable sugar production from lignocellulosic biomass using ultrasonic irradiation. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 40, p. 140-150, 2018.
- THANGARAJ, B. et al. Catalysis in biodiesel production - A review. **Clean Energy**, v. 3, n. 1, p. 2–23, 2019.

- ULLAH, K.; SHARMA, V. K.; DHINGRA, S.; BRACCIO, G.; AHMAD, M.; SOFIA, S. Assessing the lignocellulosic biomass resources potential in developing countries: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 682-698, 2015.
- VAZ JÚNIOR, S.; & SOARES, I. P. Análise química da biomassa - uma revisão das técnicas e aplicações. **Química Nova**, v. 37, n. 4, p. 709–715, 2014.
- VIDAL, W. N.; VIDAL, M. R. R.; COELHO DE PAULA, C. **Botânica Organografia: Quadros Sinóticos Ilustrados de Fanerógamos**. 5ª ed. Curitiba: Editora UFV, 2021.
- WANG, J. et al. Highly stable gasified straw slag as a novel solid base catalyst for the effective synthesis of biodiesel: Characteristics and performance. **Applied Energy**, v. 190, p. 703-712, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.004>.
- Wyman, C. E; Dale, B. E; Elander, R. T; Holtzapple, M; Ladisch, M. R; Lee, Y. Y. Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 18, p. 1959-1966, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.010>.
- YAEKASHI, C. T. O. **Análise de potencial de produção de biocombustíveis utilizando a biomassa de lentilha d'água (Lemna minor)**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Araraquara, p. 60. 2024.
- ZEEMAN, G.; HENDRIKS, A. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 1, 2009, p. 10-18, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>.
- ZHANG, T.; ZHU, M. J. Enhancing enzymolysis and fermentation efficiency of sugarcane bagasse by synergistic pretreatment of Fenton reaction and sodium hydroxide extraction. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 769-777, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.032>.
- ZHONG, S. et al. A minireview on catalytic fast co-pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil upgrading via enhancing monocyclic aromatics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 164, e105544, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105544>.