



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS

**ROMUALDO JÚLIO CAVALCANTE WANDERLEY**

**EFICIÊNCIA DO PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO NO PRÉ-TRATAMENTO DO  
RESÍDUO INDUSTRIAL DA MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*) PARA PRODUÇÃO DE  
ETANOL 2G**

PALMAS – TO

2022

**ROMUALDO JÚLIO CAVALCANTE WANDERLEY**

**EFICIÊNCIA DO PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO NO PRÉ-TRATAMENTO DO  
RESÍDUO INDUSTRIAL DA MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*) PARA PRODUÇÃO DE  
ETANOL 2G**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agroenergia, da Universidade Federal do Tocantins, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Agroenergia.

**Orientador:** Dr. Guilherme Benko de Siqueira

PALMAS – TO

2022

**ROMUALDO JÚLIO CAVALCANTE WANDERLEY**

**EFICIÊNCIA DO PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO NO PRÉ-TRATAMENTO DO  
RESÍDUO INDUSTRIAL DA MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*) PARA PRODUÇÃO DE  
ETANOL 2G**

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Dr.: Guilherme Benko de Siqueira  
Orientador

---

Dra.: Flávia Lucila Tonani de Siqueira  
Examinadora interna

---

Dra.: Elisandra Scapin  
Examinadora externa

PALMAS

2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

W245c Wanderley, Romualdo Júlio Cavalcante.

Eficiência do Peróxido de Hidrogênio no Pré-tratamento do Resíduo Industrial da Macaúba (*acrocomia aculeata*) para Produção de Etanol 2G. / Romualdo Júlio Cavalcante Wanderley. – Palmas, TO, 2022.

68 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2022.

Orientador: Guilherme Benko de Siqueira

1. Biomassas lignocelulósicas. 2. Mesocarpo, Casca e Amêndoa. 3. Concentração de glicose. 4. Etanol 2G. I. Título

**CDD 333.7**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

*Dedico este trabalho à minha vó,  
Elenice Gomes Cavalcante, e ao meu vô, João Pedro  
Gomes Cavalcante (em memória)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço às pessoas que contribuíram na elaboração e finalização dessa Dissertação.

A orientação e apoio ao prof. Dr. Guilherme Benko de Siqueira.

A disponibilidade, ajuda e confiança à prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Flávia Lucila Tonani.

A contribuição no desenvolvimento deste trabalho à prof<sup>a</sup>. Elisandra Scapin.

Agradeço a valorosa disposição em ajudar aos técnicos de laboratório, Domingos Bonfim dos Santos e Larissa Gualberto.

O apoio e presença aos meus pais, João Gomes Wanderley e Marley Gomes Cavalcante.

De igual modo, agradeço o carinho e ajuda financeira aos meus avós paternos, Júlia Gomes Wanderley e Romualdo Souza Wanderley, e vó materna, Elenice Gomes Cavalcante.

“Uma só coisa é necessário ter: um espírito leve por natureza ou um espírito tornado leve pela arte e pela ciência”.

Friedrich Nietzsche

## RESUMO

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar a eficiência do peróxido de hidrogênio no pré-tratamento dos resíduos industriais Mesocarpo + Casca extrusados (Meso + Casca Ext) e Amêndoa extrusada (Amêndoa Ext) da macaúba (*Acrocomia aculeata*) para produção de etanol 2g. As concentrações de fibra em detergente neutro, fibra em detergente ácido, lignina, hemicelulose e celulose, nas biomassas antes dos pré-tratamentos, foram quantificadas. Os tratamentos avaliados foram os efeitos dos pré-tratamentos com peróxido de hidrogênio alcalino ( $H_2O_2$ , 5% v/v) e com água destilada ( $H_2O_2$ ), sobre os coeficientes de hidrólise enzimática fibrolítica e amilolítica das biomassas (Meso + Casca Ext e Amêndoa Ext) da macaúba. O resíduo do pré-tratamento passou por hidrólise enzimática e posteriormente foi realizada a estimativa do potencial de produção de etanol pela concentração de glicose obtida após hidrólise, usando a equação de Gay-Lussac. Os efeitos do pré-tratamento com  $H_2O_2$  sobre as biomassas Meso + Casca Ext e Amêndoa Ext influenciaram no aumento do coeficiente de hidrólise enzimática da fibra. Já na hidrólise do amido, não houve diferença significativa entre os pré-tratamentos. Nesta hidrólise, ocorreu precipitação de material, verificando-se, deste modo, efeito negativo em seu coeficiente. O aumento do coeficiente de hidrólise da fibra não resultou em disponibilidade significativa de glicoses livres no mosto, haja vista os reduzidos teores de celulose hidrolisável encontrados em ambas as biomassas. Portanto, submetê-las ao processo de obtenção de etanol pode não ser o melhor caminho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biomassas lignocelulósicas; Mesocarpo, Casca e Amêndoa; Concentração de glicose.



## ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the efficiency of hydrogen peroxide in the pre-treatment of industrial residues Mesocarp + Extruded Peel (Meso + Ext Peel) and extruded Almond (Ext Almond) from macaúba (*Acrocomia aculeata*) for the production of 2g ethanol. The concentrations of neutral detergent fiber, acid detergent fiber, lignin, hemicellulose and cellulose in the biomass before pretreatments were quantified. The treatments evaluated were the effects of pre-treatments with alkaline hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ , 5% v/v) and with distilled water ( $H_2O_2$ ), on the fibrolytic and amylolytic enzymatic hydrolysis coefficients of the biomasses (Meso + Ext Peel and Almond Ext) from Macaúba. The pre-treatment residue underwent enzymatic hydrolysis and later the estimation of the potential for ethanol production was performed by the glucose concentration obtained after hydrolysis, using the Gay-Lussac equation. The effects of pre-treatment with  $H_2O_2$  on Meso + Peel Ext and Almond Ext biomass influenced the increase in the fiber enzymatic hydrolysis coefficient. In the starch hydrolysis, there was no significant difference between the pre-treatments. In this hydrolysis, precipitation of material occurred, thus verifying a negative effect on its coefficient. The increase in the fiber hydrolysis coefficient did not result in significant availability of free glucose in the wort, given the reduced levels of hydrolysable cellulose found in both biomasses. Therefore, submitting them to the process of obtaining ethanol may not be the best way.

**KEYWORDS:** Lignocellulosic biomasses; Mesocarp, Shell and Almond; Glucose concentration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Destinação de LCB para produção de carvão, briquetes e pellets.....	27
Figura 2. Fruto da macaúba ( <i>Acrocomia aculeata</i> ), (A) fruto inteiro, (B) fruto aberto, (C) Proporções relativas entre as partes.....	31
Figura 3. A fruta macaúba e suas possíveis aplicações e utilizações.....	32
Figura 4. Coeficiente de Hidrólise da Fibra (%MS) identificado na hidrólise das biomassas Amêndoa Ext e Meso + Casca Ext da Macaúba, com H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O.....	52
Figura 5. Coeficiente de Hidrólise do Amido (% MS) identificado na hidrólise das biomassas Amêndoa Ext e Meso + Casca Ext da Macaúba, com H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Densidade energética de diferentes combustíveis fósseis.....	17
Tabela 2: % de Fósseis na Matriz Energética.....	19
Tabela 3: Oferta Interna de Energia (OIE) em 2019.....	19
Tabela 4: Composição das fontes de material lignocelulósico mais comuns.....	23
Tabela 5: Produção de etanol de diferentes biomassas lignocelulósicas.....	42
Tabela 6: Caracterização das biomassas antes dos pré-tratamentos.....	48
Tabela 7. Resumo do quadro de análise de variância.....	49
Tabela 8. Resíduo obtido após o pré-tratamento das biomassas Amêndoa Ext e Meso + Casca Ext da Macaúba.....	49
Tabela 9. Concentração média de glicose (g/L) na Amêndoa Ext e no Meso + Casca Ext da Macaúba.....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Amêndoa Extrusada - (Amêndoa Ext);  
Mesocarpo mais Casca Extrusados - (Meso+Casca Ext);  
Gases de efeito estufa - (GEE);  
Oferta Interna de Energia - (OIE);  
Biomassas lignocelulósicas - (LCB);  
Universidade Federal do Tocantins - (UFT);  
Empresa de Pesquisas Energéticas - (EPE);  
Peróxido de hidrogênio alcalino - (PHA);  
Peróxido de hidrogênio alcalino - ( $H_2O_2$  alcalino);  
Sem peróxido de hidrogênio alcalino - (S/ $H_2O_2$ );  
Fibra em Detergente Neutro - (FDN);  
Fibra em Detergente Ácido - (FDA);  
Cromatografia líquida de alta eficiência - (CLAE);  
Coeficiente de hidrólise da fibra - ( $CH_{Fibra}$ );  
Coeficiente de hidrólise do amido - ( $CH_{Amido}$ );  
Laboratório de Análise de Solos e Resíduos Agroindustriais - (LASOR);  
Açúcares redutores totais - (ART);

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>16</b>
2.1 Objetivos específicos.....	16
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Principais fontes de energia .....</b>	<b>16</b>
3.1.1 Biomassas lignocelulósicas no contexto da Agroenergia.....	20
3.1.1.1 Celulose.....	23
3.1.1.2 Hemicelulose.....	24
3.1.1.3 Lignina.....	24
3.1.1.4 Carvão vegetal.....	25
3.1.1.5 Briquetes e pellets.....	26
3.1.1.6 Bagaço de cana e bioeletricidade.....	28
3.1.1.7 Possibilidades potenciais da macaúba ( <i>Acrocomia aculeata</i> ).....	28
3.1.2 Pré-tratamentos usuais e hidrólise enzimática.....	32
3.1.3 Etanol de segunda geração.....	40
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>42</b>
4.1 Local de trabalho e preparo das amostras.....	42
4.2 Parâmetros e tratamentos.....	42
4.3 Produção de Etanol.....	44
4.3.1 Pré-tratamentos das biomassas em estudo.....	45
4.3.2 Hidrólise enzimática.....	45
4.3.3 Estimativa da produção de etanol celulósico.....	46
4.4 Análises estatísticas.....	47
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
5.1 Caracterização das biomassas.....	47
5.2 Rendimento dos pré-tratamentos.....	48
5.3 Coeficientes de hidrólise da fibra e do amido.....	50
5.4 Estimativa da produção de etanol celulósico.....	53
5.4.1 Concentração de glicose.....	53
5.4.2 Etanol celulósico.....	54

**6. CONCLUSÃO.....56**

**7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....56**

## 1. Introdução

Pesquisas sobre fontes alternativas de energia se fazem imprescindíveis para o alcance dos pilares econômico, social e ambiental, isto é, do desenvolvimento sustentável. Entre essas fontes, a biomassa tem sua importância, especialmente no Brasil. A alta disponibilidade e menores custos relacionados qualificam a biomassa lignocelulósica como uma fonte promissora. Ademais, há benefícios ambientais vinculados, que correspondem ao reflorestamento e sequestro de carbono e outros serviços ambientais.

Diversas matérias-primas têm sido indicadas para diversos tipos de biocombustíveis nos últimos anos; e uma espécie que tem despertado muito interesse como matéria-prima na produção de biocombustíveis é a palmeira macaúba (*Acrocomia aculeata*), devido ao seu alto teor de óleo no fruto, produção de diversos resíduos energéticos, além de ser uma planta perene, nativa e encontrada em diversos biomas do território brasileiro (EVARISTO *et al.*, 2016a), se estendendo, ainda, do norte da Argentina e Paraguai ao México e às Índias Ocidentais (SCARIOT; LLERAS; HAY, 1991). Desse modo, por ter ampla distribuição, esta espécie pode ser conhecida por diferentes nomes, de acordo com sua região de ocorrência. Os exemplos incluem: macaúba, macaíba, bocaiúva, coco de catarro e coco de espinho no Brasil; coco, cocotero e mbocayá na Argentina; totaí na Bolívia; mbokaya no Paraguai e ko ko ginen no Haiti (CARDOSO *et al.*, 2017).

Os resíduos lignocelulósicos gerados no Brasil, incluindo os oriundos do processo de extração de óleo da macaúba, podem ser utilizados para produção de etanol 2G. Um dos desafios está relacionado à complexa estrutura da biomassa lignocelulósica, com características recalcitrantes e heterogêneas (WEI *et al.*, 2017), na qual a celulose (um polímero de carboidrato) é envolvida pela estrutura densa formada por hemicelulose (outro polímero de carboidrato) e lignina (polímero aromático) (YOUSUF; PIROZZI; SANNINO, 2020). A celulose está presente como o principal material da parede celular da biomassa (BEMILLER, 2019), e sua conversão em etanol celulósico é um importante recurso alternativo de combustível (GANGULY *et al.*, 2020). Para isso, o processo de conversão deve acontecer em quatro estágios principais, sendo: pré-tratamento, hidrólise (química ou enzimática), fermentação e separação/destilação do etanol (BALAT, 2011). A presença de lignina na biomassa inibe a hidrólise de celulose e hemicelulose (KUMAR; SHARMA, 2017). Portanto, para facilitar o processo de hidrólise, o pré-tratamento é conduzido para quebrar a camada mais externa de lignina para expor o núcleo de carboidratos. Em vista disso,

uma série de diferentes métodos tradicionais de pré-tratamento são exaustivamente investigados em uma variedade de biomassa lignocelulósica (HALDAR; PURKAIT, 2021).

De forma geral, o pré-tratamento da biomassa pode ser classificado em quatro categorias, de acordo com a função e reagente utilizado, sendo nomeadamente os pré-tratamentos físico, químico, biológico e combinado (híbrido) (ZHANG *et al.*, 2020). No entanto, um processo de pré-tratamento econômico e ecologicamente viável para a produção sustentável de bioetanol celulósico não foi estabelecido. Um pré-tratamento adequado não deve apenas melhorar a hidrólise enzimática de materiais lignocelulósicos, mas também facilitar a separação de lignina e hemicelulose (SUN *et al.*, 2016).

## 2. Objetivo geral

Avaliar a eficiência do peróxido de hidrogênio no pré-tratamento dos resíduos industriais da macaúba (*Acrocomia aculeata*) para produção de etanol 2g.

### 2.1 Objetivos específicos

- Caracterizar a composição química-bromatológica dos resíduos industriais Mesocarpo + Casca extrusados e Amêndoa extrusada da Macaúba;
- Quantificar os resíduos industriais da macaúba após os pré-tratamentos;
- Determinar o coeficiente de hidrólise da fração fibrosa dos resíduos industriais da macaúba;
- Determinar o coeficiente de hidrólise da fração amilácea dos resíduos industriais da macaúba;
- Quantificar as concentrações de glicose dos resíduos industriais da macaúba após hidrólise;
- Estimar a produção de etanol dos resíduos industriais da macaúba.

## 3. Referencial teórico

### 3.1 Principais fontes de energia

A principal tendência no desenvolvimento da energia global, ao longo da história da humanidade, é o crescimento contínuo da produção e do consumo de energia. Ao mesmo tempo, ocorre uma transformação da estrutura regional e mercantil de produção e consumo de recursos energéticos sob a influência de fatores tecnológicos, geopolíticos, financeiros, econômicos e



ambientais (PROVORNAYA et al. 2020). Em vista disso, o conceito de desenvolvimento de energia sustentável evoluiu para se tornar um importante objetivo de política abordado por governos em todo o mundo (GUNNARSDOTTIR et al., 2021). Para estes autores, a energia é considerada um facilitador necessário para o desenvolvimento social e econômico e, conseqüentemente, o desenvolvimento sustentável.

As fontes de energia são classificadas em renováveis e não renováveis. As fontes não renováveis são finitas ou esgotáveis. Para a maioria delas, a reposição na natureza é muito lenta, pois resulta de um processo de milhões de anos sob condições específicas de temperatura e pressão. Quanto mais usamos as fontes de energia não renováveis, menos teremos no estoque total. São exemplos de fontes não renováveis de energia: petróleo, carvão mineral, gás natural e nuclear. Já as fontes de energia renováveis são consideradas inesgotáveis, pois suas quantidades se renovam constantemente ao serem usadas. São exemplos de fontes renováveis: hídrica (energia da água dos rios), solar (energia do sol), eólica (energia do vento), biomassa (energia de matéria orgânica), geotérmica (energia do interior da Terra), oceânica (energia das marés e das ondas) e hidrogênio (energia química da molécula de hidrogênio) (EPE, 2020).

O petróleo continua sendo a principal fonte de energia, devido ao seu alto teor de energia (Tabela 1) e facilidade de uso (VISWANATHAN, 2017). No entanto, dada a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em todos os setores da economia, as empresas de petróleo e gás devem se interessar em reduzir as pegadas de GEE do uso de energia em suas operações (WANG, O'DONNELL, BRANDT, 2017). A pegada de dióxido de carbono é principalmente causada por emissões de combustíveis fósseis e tornou-se uma grande preocupação para formuladores de políticas e analistas em muitos países (RAZMJOO et al., 2021). Nessa linha de raciocínio, as energias renováveis são importantes na questão ambiental, pois sua produção se dá de forma cíclica e libera uma menor quantidade de CO<sub>2</sub>, contribuindo para reduzir a degradação do planeta (MONTENEGRO; PAIVA; FEITOSA, 2020).

**Tabela 1.** Densidade energética de diferentes combustíveis fósseis.

<b>Combustível</b>	<b>Densidade energética</b>
Petróleo	45 MJ/kg
Carvão	24 MJ/kg
Gás natural	34-38 MJ/m <sup>3</sup>

Fonte: Adaptado de Viswanathan (2017).

A compreensão das questões ambientais e energéticas é de extrema importância (RAZMJOO et al., 2021). A última década é caracterizada pelo rápido crescimento dos investimentos em fontes renováveis de energia, acompanhado por um aumento significativo no número de estudos focados em vários aspectos nesta área, feitos do ponto de vista da economia, bem como da academia (DJURISIC et al., 2020), como sustentabilidade energética, segurança energética e proteção ambiental (YU et al., 2020).

Este é um grande desafio, pois os países contribuem para o aumento das mudanças climáticas e precisam limitar o uso de combustíveis fósseis. Além disso, o uso e gestão eficazes de fontes de energia renováveis, bem como a distribuição e planejamento da geração de energia, apresentam vários desafios (MOHAMMED; AL-BAZI, 2020), como os investimentos nas novas centrais solares e eólicas. Um período de investimento intensivo traz também uma competitividade significativa, a necessidade de reduzir custos e aumentar a eficiência das fontes, para que o conceito de fontes renováveis tenha não só justificativa e raciocínio ecológico, mas também econômico (DJURISIC et al., 2020). Segundo Zhao, Fan, Zhang (2021), a melhoria da eficiência energética é uma forma eficaz de economizar energia e mitigar as emissões de GEE. Em particular, a eficiência é um critério essencial na produção de energia. Portanto, em fontes de energia renováveis, a tecnologia avançada ou inovação deve ser aplicada para aumentar a eficiência e diminuir custos (ALKAN; ALBAYRAK, 2020).

Embora as transições de energia sejam processos lentos, o atual processo está ocorrendo em tempo recorde. Políticas implementadas desde meados da década de 1990 estão favorecendo uma mudança acelerada do mix de energia, e o Acordo de Paris pode levar a uma transição ainda mais rápida nas próximas três décadas (BLAZQUEZ; FUENTES; MANZANO, 2020). Para atingir as metas de energia sustentável e transição para uma economia de baixo carbono, é necessário diversificar os sistemas elétricos centrais através da implantação de recursos de energia limpa e renovável. Isso irá aprimorar os sistemas elétricos atuais e torná-los mais confiáveis, o que garantirá a segurança energética no longo prazo (RAZMJOO et al., 2021).

Em relação à participação energética, nos últimos 46 anos, as Matrizes Energéticas do Brasil e de outros blocos do mundo apresentaram significativas alterações estruturais. No Brasil, houve forte aumento na participação da energia hidráulica, da bioenergia líquida e do gás natural.

No bloco da OCDE<sup>1</sup>, houve forte incremento da energia nuclear, e a seguir, do gás natural. Em “Outros” países, houve forte incremento do gás natural. Em todos os blocos houve recuo na participação de derivados de petróleo (DANILOW et al., 2020) (Tabela 2).

**Tabela 2.** % de Fósseis na Matriz Energética.

<b>2019%</b>	<b>Brasil</b>	<b>OCDE</b>	<b>Outros</b>
	52,4	79,5	81,7

Fonte: Adaptado de Danilow et al. (2020).

No Brasil, segundo informações extraídas da Resenha Energética Brasileira, a Oferta Interna de Energia – OIE, em 2019, foi de 294 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo), ou Mtep, mostrando aumento de 1,4% em relação a 2018, e recuo de 3,8% em relação a 2014, ano de recorde da OIE (305,6 Mtep) (DANILOW et al., 2020). As fontes renováveis tiveram alta de 2,8%, sustentada por fortes altas em produtos da cana, eólica, solar e biodiesel. A oferta de energia hidráulica foi a única que recuou (-0,3%). Nas fontes não renováveis houve um pequeno aumento, de 0,3%, ficando petróleo e derivados com a maior taxa, de 1,4% (Tabela 3). Um recuo de 9% na produção de aço de 2019 influenciou a taxa negativa da demanda de carvão (DANILOW et al., 2020). Ainda assim, de 2018 para 2019, aumentaram a participação nas renováveis: etanol e bagaço 0,6 ponto percentual; eólica 0,3; biodiesel 0,3; solar 0,2 e lenha/carvão vegetal 0,5% (DANILOW et al., 2020).

**Tabela 3.** Oferta Interna de Energia (OIE) em 2019.

<b>ESPECIFICAÇÃO</b>	<b>mil tep</b>		<b>19/18</b>	<b>Estrutura %</b>	
	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>%</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
<b>NÃO-RENOVÁVEL</b>	<b>157.972</b>	<b>158.395</b>	<b>0,3</b>	<b>54,5</b>	<b>53,9</b>
Petróleo e Derivados	99.627	101.051	1,4	34,4	34,4
Gás natural	35.905	35.909	0,0	12,4	12,2
Carvão mineral e Derivados	16.418	15.480	-5,7	5,7	5,3
Urânio (U3O8) e Derivados	4.174	4.174	0,0	1,4	1,4
Outras não-renováveis (a)	1.848	1.780	-3,7	0,6	0,6

<sup>1</sup> Os 36 países membros da Organisation de Coopération et de Développement Économiques – OCDE (Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico): Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Coreia do Sul, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Eslovaca, República Tcheca, Suíça, Suécia e Turquia.

<b>RENOVÁVEL</b>	<b>131.898</b>	<b>135.642</b>	<b>2,8</b>	<b>45,5</b>	<b>46,1</b>
Hidráulica e Eletricidade	36.460	36.364	-0,3	12,6	12,4
Lenha e Carvão vegetal	25.511	25.725	0,8	8,8	8,7
Derivados da Cana-de-açúcar	50.090	52.841	5,5	17,3	18,0
Outras renováveis (b)	19.837	20.712	4,4	6,8	7,0
<b>TOTAL</b>	<b>289.870</b>	<b>294.036</b>	<b>1,4</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
dos quais fósseis	153.798	154.221	0,3	53,1	52,4

(a) Gás de alto-forno, de aciaria e de enxofre; (b) lixívia, biodiesel, eólica, solar, casca de arroz, biogás, resíduos de madeira, gás de carvão vegetal e capim elefante.

Fonte: Adaptado de Danilow et al. (2020).

Com relação à matriz elétrica, o Brasil, comparativamente ao mundo, apresenta uma significativa diferença na participação da energia hidráulica, de 64,9% em 2019, contra apenas 12,9% na OCDE, e de 15,5% nos outros países. Na bioenergia sólida, o Brasil também se destaca, com 8,4% de participação (forte geração por bagaço de cana e lixívia) (DANILOW et al., 2020). Além dessas, outras fontes renováveis ganham destaque na matriz de geração elétrica do País, a exemplo da energia eólica e da energia solar, inseridas mais recentemente (BEZERRA, 2020).

Uma característica particular do Brasil é o desenvolvimento industrial em grande escala e a aplicação das tecnologias de energia de biomassa. Bons exemplos disso são: a produção do etanol a partir da cana-de-açúcar, o carvão vegetal oriundo de plantações de eucaliptos, a cogeração de eletricidade do bagaço de cana e o uso da biomassa em indústrias de papel e celulose (cascas e resíduos de árvores, serragem, licor negro etc.) (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

### 3.1.1 Biomassas lignocelulósicas no contexto da Agroenergia

O rápido esgotamento dos combustíveis fósseis e as preocupações ambientais forçaram a comunidade científica a reavaliar a utilização de combustíveis fósseis e encontrar alternativas sustentáveis. A biomassa lignocelulósica possui grande potencial para atuar como alternativa eficiente aos combustíveis fósseis (KUMAR *et al.*, 2020). Nas últimas décadas, a biomassa lignocelulósica foi revisada como uma matéria-prima para a produção de biocombustíveis (WANG et al., 2020). Neste cenário, a biomassa se tornou um dos mercados mais promissores para fontes de energia renováveis (HAMRAOUI *et al.*, 2020), haja vista que ela pode ser convertida em três produtos diferentes (gasoso, líquido ou sólido) usando processos de tratamento termoquímico (MAMVURA; DANHA, 2020). Como seu teor de umidade geralmente fica abaixo de 60%, esse

tipo de biomassa é frequentemente convertido em combustíveis por meio de processos termoquímicos (CIRIA; BARRO, 2016). Contudo, várias tecnologias químicas, termoquímicas e biológicas foram desenvolvidas para a conversão de biomassa lignocelulósica em energia (WANG et al., 2020).

As biomassas lignocelulósicas (LCB) são responsáveis por 50% do total mundial de biomassa disponível (HALDAR; PURKAIT, 2021), e estão sendo exploradas como matérias-primas para a produção de etanol. Todos os materiais lignocelulósicos são, em princípio, adequados para a produção de etanol (CASTOLDI *et al.*, 2014). O material lignocelulósico é composto basicamente de celulose, hemicelulose e lignina (BALAT, 2011) e a conversão em álcool requer um processo de quatro etapas, já relatadas na Introdução por este autor. A tecnologia de pré-tratamento de matérias-primas é o processo mais complicado na produção de bioetanol e é realizada atualmente com catalisadores ou produtos químicos, que são adicionados em processos de pré-tratamento (KÜÜT et al., 2019).

A LCB, segundo Yousuf, Pirozzi e Sannino (2020), é geralmente classificada em três tipos de resíduos: biomassa residual, biomassa virgem e culturas energéticas. Árvores, arbustos e gramíneas são colocados em classe de biomassa virgem, enquanto resíduo agrícola, palha e bagaço são colocados na classe de biomassa residual (YOUSUF; PIROZZI; SANNINO, 2020). A biomassa agrícola residual é produzida no campo como consequência das atividades agrícolas (CIRIA; BARRO, 2016). As culturas energéticas, por sua vez, são matérias-primas utilizadas para a produção de biocombustíveis de segunda geração, pois oferecem alta produtividade de biomassa (YOUSUF; PIROZZI; SANNINO, 2020).

A biomassa residual é uma fonte valiosa de celulose e lignina. A quantidade abundante de biomassa lignocelulósica de produção agrícola garante um fornecimento constante de matérias-primas para aplicações em larga escala, onde os resíduos são, então, convertidos em biocombustíveis, biogás e produtos bioquímicos por meio de biotecnologias, como digestão anaeróbia e fermentação (VU et al., 2020). A credibilidade econômica e ambiental dos coprodutos é essencial para justificar completamente que os investimentos no setor de biocombustíveis são lucrativos e atenderão às atuais demandas de energia e também reduzirão as emissões de gases de efeito estufa (ARUN; DALAI, 2020).

Segundo Bonatto et al. (2020), políticas globais são necessárias para o desenvolvimento mundial de biocombustíveis, dadas as tendências em crescimento populacional, demanda

energética e produção de resíduos. O uso de resíduos de biomassa para fins energéticos oferece vantagens econômicas, sociais e ambientais que auxiliam no crescimento sustentável do mundo (BONATTO et al., 2020).

Em relação ao potencial de utilização de LCB para produção de biogás, Abraham et al. (2020) revisaram as estratégias de pré-tratamentos para aumentar a produção de biogás de substratos lignocelulósicos. De acordo com os autores ora citados, estas biomassas apresentam grande potencial para produção de biometano, mas sua natureza recalcitrante inerente limita seu uso em processos de digestão anaeróbia. Assim, o pré-tratamento é uma etapa necessária para a utilização eficiente da biomassa no processo de digestão anaeróbia (ABRAHAM et al., 2020). Ademais, a estrutura complexa da lignocelulose também causa problemas para a compreensão do desempenho da fermentação da celulose, hemicelulose e lignina na produção de biogás e prejudica a utilização eficiente da biomassa (MA et al., 2019). Deste modo, mais pesquisas serão essenciais para tornar os métodos de pré-tratamento econômicos e sustentáveis para a produção eficiente de biogás (ABRAHAM et al., 2020), assim como para tornar os métodos de digestão anaeróbia e fermentação mais eficientes, a partir de diferentes substratos de LCB.

A título de inovação e desafio, Hamawand et al. (2020) elaboraram, diante das tecnologias existentes para biocombustíveis, a seguinte hipótese: reduzir o tamanho das partículas de biomassa residual para nanoescala usando ajuda mecânica é o futuro da produção de biocombustíveis a partir de biomassa. Além disso, lignina, celulose e hemicelulose podem ser separadas com mais eficiência no nível da nanoescala. Nanopartículas de biomassa podem ser usadas diretamente nos processos de fermentação. O processo de fermentação não exigirá nem hidrólise enzimática nem as caras etapas de pré-tratamento da lignocelulose (HAMAWAND et al., 2020). Contudo, outros métodos de redução podem ser necessários, como raios gama, ondas ultrassônicas e plasma líquido. Se necessário, alguns produtos químicos, como peróxido de hidrogênio combinado com irradiação, podem ser usados em baixa concentração para quebrar as ligações de hidrogênio (HAMAWAND et al., 2020). Sendo assim, as etapas de pré-tratamento e hidrólise enzimática continuam válidas.

Em outro estudo, Kumar e Sharma (2017) elencaram a composição dos materiais lignocelulósicos mais comuns, destacando os teores percentuais de celulose, hemicelulose e lignina (Tabela 4). Observa-se das biomassas destacadas que o teor de lignina variou de 0 a 50%, enquanto que o teor de celulose variou de 5 a 99%. Isso mostra que há uma variação importante nos teores de carboidratos e lignina nas diferentes biomassas lignocelulósicas. Nota-se, também, na referida

Tabela, a ausência de lignocelulósicos que são relevantes aqui no Brasil, a exemplo dos resíduos oriundos da extração de óleo do fruto da Macaúba. Essas informações corroboram a necessidade de se avaliar os potenciais energéticos dos referidos resíduos.

**Tabela 4.** Composição das fontes de material lignocelulósico mais comuns.

<b>MATERIAL LIGNOCELULÓSICO</b>	<b>Celulose %</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>
Bagasso de cana-de-açúcar	42	25	20
Sorgo sacarino	45	27	21
Madeira de angiospermas (Hardwood)	40–55	24-40	18-25
Madeira de gimnospermas (Softwood)	45–50	25-35	25-35
Sabugo de milho	45	35	15
Palha de milho	38	26	19
Palha de arroz	32	24	18
Casca de noz	25–30	25-30	30-40
Resíduo de jornal	40–55	25-40	18-30
Gramíneas	25–40	25-50	10-30
Palha de trigo	29–35	26-32	16-21
Casca de banana	13.2	14.8	14
Bagaço	54.87	16.52	23.33
Fibras de esponja vegetal	66.59	17.44	15.46
Resíduos agrícolas	5–15	37-50	25-50
Papel	85–99	0	0-15
<i>Switchgrass</i>	45	31.4	12

Fonte: Adaptado de Kumar e Sharma, 2017.

### 3.1.1.1 Celulose

A celulose é o polímero natural mais importante do mundo. Fornece força e rigidez, evitando o inchaço da célula, com conseqüente ruptura da membrana plasmática, quando as condições osmóticas favorecem a entrada excessiva de água na célula (SANTOS et al., 2020). Em adição, as fibras celulósicas derivadas de LCB possuem diversas vantagens como abundância, baixo custo, são renováveis, alta resistência específica e superfícies reativas (HALDAR, PURKAIT, 2020). A reatividade da celulose é determinada pelos grupos funcionais presentes em sua estrutura e pelas interações físico-químicas entre as macromoléculas (celulose, hemiceluloses e lignina) (SANTOS et al., 2020).

A celulose possui alto peso molecular, é linear e homopolímero insolúvel de unidades *b*-D-glicopiranosil unidas por ligações glicosídicas (1/4); e devido à sua linearidade e natureza estereorregular, as moléculas de celulose se associam em regiões estendidas, formando feixes fibrosos policristalinos, onde as cadeias moleculares nas regiões cristalinas são mantidas juntas por numerosas ligações de hidrogênio (BEMILLER, 2019). Essas redes de ligações (inter e intra) de hidrogênio promovem a durabilidade das moléculas celulósicas e geram a alta rigidez axial em fibrilas de celulose (ALLE et al., 2020). Entretanto, alguns solventes podem interromper as ligações de hidrogênio intermoleculares da celulose (BEMILLER, 2019). As regiões amorfas da celulose são altamente suscetíveis a hidrólise devido à menor cristalinidade. (ALLE et al., 2020).

A extração de celulose de LCB e subsequente formação de derivados apresentam potencial promissor em um contexto de biorrefinaria, mencionam Haldar e Purkait (2020). A estrutura e propriedades funcionais de derivados celulósicos também são exploradas em vários outros eventos, como alternativa aos materiais de embalagem convencionais, detecção de íons metálicos, fabricação de produtos / peças eletrônicas, etc. (HALDAR, PURKAIT, 2020).

#### 3.1.1.2 Hemicelulose

A exploração dos componentes de hemicelulose e lignina é uma das outras vantagens da utilização de biomassa lignocelulósica como matéria-prima (GANGULY et al., 2020). As hemiceluloses são heteropolissacarídeos complexos, com cadeias menores que as da celulose, compostas por D-glicose, D-galactose, D-manose, D-xilose, L-arabinose, ácido D-glucurônico e ácido 4-O-metil-glucurônico. Sua composição química varia de acordo com as plantas, o tipo de tecido, o estágio, as condições de cultivo e os locais de armazenamento (SANTOS et al., 2020). A hemicelulose forma microfibrilas com celulose e, normalmente, é reticulada com lignina para fornecer estabilidade estrutural à biomassa. (HALDAR, PURKAIT, 2020). Devido à sua estrutura amorfa, a hemicelulose é menos estável (YU et al., 2017).

#### 3.1.1.3 Lignina

A lignina é um polímero multifuncional de rede fenólica, hidrofóbica e amorfa (GANGULY et al., 2020), tornando-o mais difícil de decompor (YU et al., 2017). É o segundo recurso orgânico renovável mais importante. A lignina oferece escopo ilimitado para fins industriais, sendo uma das fontes mais importantes de material para a preparação de uma variedade de produtos químicos (GANGULY et al., 2020). Nesta perspectiva, pesquisas têm sido realizadas



no sentido de desvendar rotas catalíticas, efeitos de solventes e processos de despolimerização, a fim de consolidar metodologias de quebra da lignina em seus compostos monofenólicos visando posteriores conversões em produtos de valor agregado (CHEN *et al.*, 2018).

Dado o crescente potencial de aplicação industrial da lignina, o foco recente deixou de considerá-la um incômodo que dificulta a extração de celulose e hemicelulose para uma importante matéria-prima industrial (WEISS *et al.*, 2020). Todavia, a complexa estrutura da lignina e as várias ligações entre suas unidades monoméricas tornam a transformação da lignina um processo complexo, hajam vistas aos processos atuais de transformação / despolimerização aplicados à lignina que são caros e requerem condições de reação intensas (ZEVALLOS TORRES *et al.*, 2020). Portanto, ainda Zevallos Torres *et al.* (2020), o desenvolvimento de novos processos eficientes e de baixo custo é a chave para poder aproveitar as vantagens da lignina pela abordagem de despolimerização.

A lignina tem, também, um papel importante na qualidade de lenha e madeira, para fins energéticos. Surup *et al.* (2020) estudaram o efeito da composição da madeira e do método de extração por CO<sub>2</sub> supercrítico, como pré-tratamento, na produção de carvão vegetal, nas indústrias de ferro-ligas. Entre as conclusões, esses autores relataram que altas temperaturas de tratamento térmico e alto teor de lignina em biomassa melhoram as propriedades dielétricas e aumentam o grau de grafitização do carvão vegetal.

#### 3.1.1.4 Carvão vegetal

A conversão de biomassa em carvão permite o armazenamento da maior parte da energia da matéria-prima primária que, de outra forma, teria sido degradada biologicamente (MIRANDA *et al.*, 2020). A torrefação e carbonização são duas das técnicas bem conhecidas aplicadas à biomassa para obter um carvão com propriedades de combustível melhoradas (BILGIC *et al.*, 2016). A produção e a qualidade do carvão vegetal são influenciadas, consideravelmente, pelas propriedades da madeira (LIMA *et al.*, 2020), sendo a qualidade física do material um critério fundamental para uma escolha adequada de carvão vegetal para aplicações na indústria siderúrgica (DE PAULA PROTÁSIO *et al.*, 2021).

Avaliando parâmetros de produtividade e qualidade do carvão vegetal para classificação confiável de clones de eucalipto das florestas energéticas brasileiras, De Paula Protásio *et al.* (2021) constataram que os clones 1004 (*E. urophylla* x *E. camaldulensis*), 1009 (*Eucalyptus urophylla*) e 1039 (*E. grandis* hybrid) apresentaram viabilidade para a produção de carvão vegetal para uso na

indústria. A pirólise do clone 1037 (*Eucalyptus* sp.) é recomendada para a produção de carvão vegetal utilizado em churrasqueiras e outros usos domésticos (DE PAULA PROTÁSIO et al., 2021).

A influência das temperaturas de pirólise sobre comportamentos de combustão do carvão de bambu foi diagnosticada por Hu et al. (2021). A temperatura de pirólise de 350 °C foi um ponto essencial para o desaparecimento da combustão de voláteis. O Poder Calorífico Superior máximo de 32,44 MJ/kg ocorreu a 650 °C de temperatura, mas a energia de ativação máxima de 153 kJ/mol foi encontrada a 550 °C de temperatura. As temperaturas de pirólise influenciaram significativamente as propriedades de combustão do carvão de bambu (HU et al., 2021). Nesse contexto, avaliando espigas de milho, Kluska, Ochnio e Kardaš (2020) mostraram que o rendimento de materiais voláteis do carvão diminuiu, enquanto o rendimento de carbono fixo e Poder Calorífico Superior aumentaram, juntamente com maiores temperaturas de carbonização.

Em análise sobre o carvão vegetal de resíduos madeireiros de manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira, Lima et al. (2020) revelaram alguns aspectos. Em suma, os extrativos totais superaram o efeito da lignina no balanço de massa da carbonização, rendimentos e qualidade do carvão. Observou-se, para tanto, baixa variação interespecífica nos níveis de lignina, contrastando com uma ampla gama de níveis de extrativos totais encontrados para as matas da Amazônia.

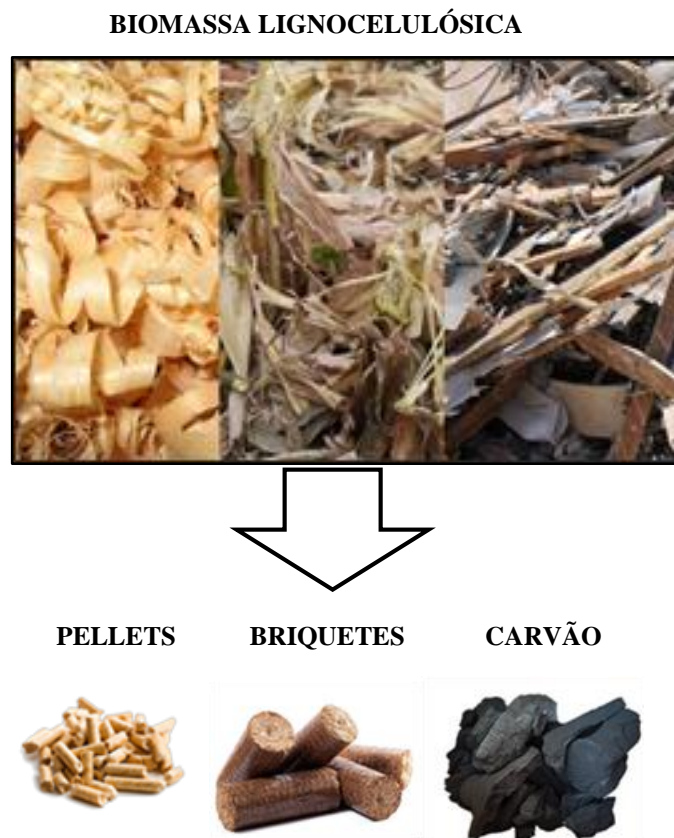
Por fim, os resíduos da exploração madeireira têm forte apelo ambiental em relação ao rendimento gravimétrico do carvão vegetal, que é vital para atender às necessidades industriais e domésticas (LIMA et al., 2020).

#### 3.1.1.5 Briquetes e pellets

Outra forma de agregar energia ao material lignocelulósico, com destaque para os resíduos, é a briquetagem. A técnica de briquetagem usada para converter resíduos vegetais de mercado é uma das melhores soluções para aproveitar os resíduos, em vez de descartá-los em lixões (AFSAL et al., 2020). Sobre a técnica, Bonsu, Takase e Mantey (2020) avaliaram a preparação de briquetes de carvão vegetal a partir de cascas de dendê, em Gana. Estes briquetes foram considerados ecologicamente limpos e menos caro de produzir. As qualidades do briquete de casca de dendê ressaltaram sua importância como um combustível adequado. O briquete produzido, do experimento, apresentava propriedades de combustão adequadas para uso doméstico devido às emissões limitadas de fumaça, contribuindo para uma diminuição da poluição interna e externa (BONSU; TAKASE; MANTEY, 2020) do ambiente.

A caracterização das propriedades físico-químicas, mecânicas e energéticas de pellets feitos de quatro tipos diferentes de biomassa (*Paulownia*, *Miscanthus*, *Eucalyptus* e *Pinus*) foi um dos objetivos realizados por Pegoretti de Souza et al. (2020). A peletização é um processo mecânico para aumentar a densidade de biomassa, o que leva a uma redução significativa nos custos de transporte, armazenamento e manuseio (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2021). Os resultados do estudo feito por Pegoretti de Souza et al. (2020) mostraram que as propriedades da biomassa florestal de árvores jovens desfolhadas (*Pinus radiata* e *Eucalyptus nitens*) eram mais adequadas para a produção de pellet do que aquelas de *Paulownia elongata* × *fortunei* e da biomassa não lenhosa (Hastes de *Miscanthus giganteus*). Os pellets de *P. radiata* foram classificados com o maior Índice de Preço de Combustível; e a espécie se mostrou capaz de produzir pellets de qualidade para uso doméstico, mesmo quando produzidos com madeira, cascas e galhos de árvores jovens (PEGORETTI DE SOUZA et al., 2020).

A figura a seguir (Figura 1) ilustra a utilização de biomassa lignocelulósica para formação de carvão vegetal, briquetes e pellets. Essa representação é meramente ilustrativa.



**Figura 1.** Destinação de LCB para produção de carvão, briquetes e pellets.

Fonte: O autor.

### 3.1.1.6 Bagaço de cana e bioeletricidade

Ressalta-se, por fim, mas de igual importância, a utilização da biomassa para geração de eletricidade, com especial destaque para os resíduos da cana-de-açúcar. Com alto teor de fibra, o bagaço da cana-de-açúcar, desde a revolução industrial, tem sido utilizado na produção de vapor e energia elétrica para a produção de açúcar e etanol, garantindo a autossuficiência energética das usinas durante a safra (DE SOUZA, 2020). A bioeletricidade que utiliza o bagaço da cana como insumo é uma fonte estratégica para o sistema elétrico brasileiro, devido ao sincronismo de complementaridade entre safra de cana-de-açúcar e o período em que os tanques de água estão em seus níveis mais baixos (CARPIO; SIMONE DE SOUZA, 2017).

O volume de resíduos do processamento da cana é muito alto (PAZUCH et al., 2017). O bagaço é um subproduto da produção de etanol e atualmente está sendo usado para produzir vapor em caldeiras (CARPIO; SIMONE DE SOUZA, 2017) e bioeletricidade. Em geral, a adoção de caldeiras de alta eficiência foi desencadeada por construção recente de modernas usinas de cana-de-açúcar de média capacidade que concebem a bioeletricidade como modelo de negócios centrais, como etanol e açúcar (CERVI et al., 2019). O etanol e a bioeletricidade são produtos que se respeitam e precisam de um ambiente de negócios que seja atraente para seu desenvolvimento e que aproveite seu incrível potencial à disposição da sociedade civil (DE SOUZA, 2020).

### 3.1.1.7 Possibilidades potenciais da macaúba (*Acrocomia aculeata*)

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Lacq) Lood. ex Mart), palmeira de ampla distribuição nos biomas brasileiros Cerrado e Pantanal, é uma espécie com grande potencial de exploração econômica imediata. Apresenta elevada produtividade de óleo e coprodutos a partir do quarto ano de crescimento, com vida útil de exploração superior a 25 anos (FAVARO; MIRANDA, 2013). Por se adaptar bem a regiões áridas e semiáridas, a macaúba pode ser cultivada em áreas marginais ou com certo grau de degradação ambiental, contribuindo para a redução dos impactos ambientais decorrentes dos sucessivos desmatamentos para plantio de oleaginosas (ARAÚJO et al., 2017).

Um modelo de nicho ecológico, desenvolvido por Plath et al. (2016), revelou uma grande área de distribuição potencial para *A. aculeata* na América Latina, indicando um alto potencial de cultivo sob as condições atuais do ambiente. Estes autores relataram, ainda, que o Brasil, de acordo com a intensidade de atividades de implantação atuais, detém a maior área potencial, mas que os fatores locais, considerações ecológicas e sociais precisam ser avaliados adequadamente se o

objetivo for produzir óleo vegetal de maneira sustentável. Outros fatores ecológicos, como interações de espécies (por exemplo, competição) e atividades humanas (por exemplo, perturbação) são determinantes importantes da distribuição de espécies em escala regional que pode restringir a alocação prevista pelo modelo de áreas adequadas para *A. Aculeata* (PLATH et al., 2016).

O fruto da macaúba tem sido recomendado como uma boa alternativa para a produção de biocombustíveis (MACHADO; FIGUEIREDO; GUIMARÃES, 2016). Ao analisar o ciclo de vida do cultivo da Macaúba, Fernández-coppel et al. (2017) constataram que a introdução da Macaúba como candidata à produção de biocombustíveis apresenta benefícios ambientais em relação às culturas energéticas como a colza, o girassol, a mamona ou o pinhão-manso. Mesmo assim e apesar do apelo econômico e agrícola da Macaúba, seus plantios comerciais ainda são incipientes devido, em parte, à falta de informações adequadas, como a relação das espécies com as condições edafoclimáticas (REZENDE *et al.*, 2020), bem como sobre os potenciais econômicos e ambientais do aproveitamento dos resíduos gerados no processo de extração do óleo, o que gera valor às plantações de Macaúba.

Com relação às condições edafoclimáticas, Souza et al. (2019), estudando a dinâmica do banco de sementes da macaúba, constataram que a associação entre altas amplitudes térmicas no inverno e altas temperaturas na primavera promove a superação da dormência e favorece o estabelecimento de mudas na estação chuvosa. A alta produtividade das plantas adultas, a capacidade de manter embriões viáveis no solo e a dormência das sementes contribuem para o controle da dinâmica do banco de sementes no solo, favorecendo o sucesso produtivo de *A. aculeata* e sua ampla distribuição geográfica (SOUZA et al., 2019).

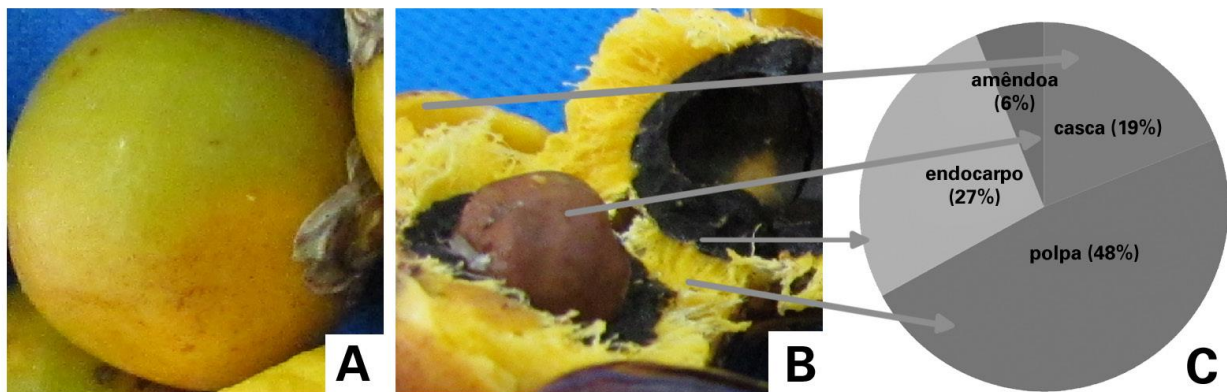
Diante desse contexto, pesquisadores relatam o desafio de transformar a palmeira *A. aculeata* em uma planta de cultivo doméstico para cumprir seu potencial e estabelecer protocolos pré e pós-colheita. Na verdade, a colheita e manuseio pós-colheita e as etapas de pré-processamento tendem a ser um fator importante para evitar a hidrólise dos triglicerídeos, o que geralmente contribui para a obtenção de óleos vegetais de baixa acidez (PRATES-VALÉRIO; CELAYETA; CREN, 2019). Estabelecer práticas pós-colheita da Macaúba que abrangem o aumento do teor de óleo junto com a manutenção da qualidade é um desafio a ser administrado (TILAHUN *et al.*, 2020).

Observa-se, ainda, que a *A. aculeata* apresenta diversidade genética (SILVA *et al.*, 2017), e é uma cultura potencial para ser utilizada na produção de biodiesel, devido ao seu alto rendimento,

fácil adaptação a diferentes ecossistemas, baixo custo das frutas e boa valorização de seus coprodutos. No entanto, a exploração real desta espécie ocorre principalmente em grandes populações naturais, o que torna essencial a domesticação e aprimoramento do processamento da mesma com o objetivo de garantir a disponibilidade de Macaúba para uso prolongado (LOPES *et al.*, 2013). Nesse sentido, o melhoramento genético é um dos pilares da domesticação e exploração intensiva das culturas. A compreensão da variabilidade genética das espécies e sua relação com o meio ambiente é de grande importância para fornecer uma base para programas de melhoramento de sucesso (SILVA *et al.*, 2017).

O óleo extraído da polpa e da amêndoa pode ser usado para vários fins, como para cosméticos e medicamentos (CARDOSO *et al.*, 2017) e bio-hidrocarbonetos (SILVA FREITAS *et al.*, 2020). Neste sentido, o óleo da polpa de macaúba surge como potencial fonte de matéria-prima para sintetizar biocombustíveis de grande interesse comercial e industrial, como o biodiesel e o bioquerosene (MOREIRA; RESENDE; PASA, 2020), enquanto que o óleo de amêndoa de macaúba tem desempenhado papéis importantes devido à sua composição particular (MAGALHÃES, 2020).

Outro aspecto para a viabilidade da cadeia produtiva desta oleaginosa é a possibilidade de aproveitamento integral dos coprodutos. O fruto é constituído de casca, polpa (mesocarpo), caroço (endocarpo) e amêndoa. A maior parte do fruto corresponde à polpa (FAVARO; MIRANDA, 2013) (Figura 2).



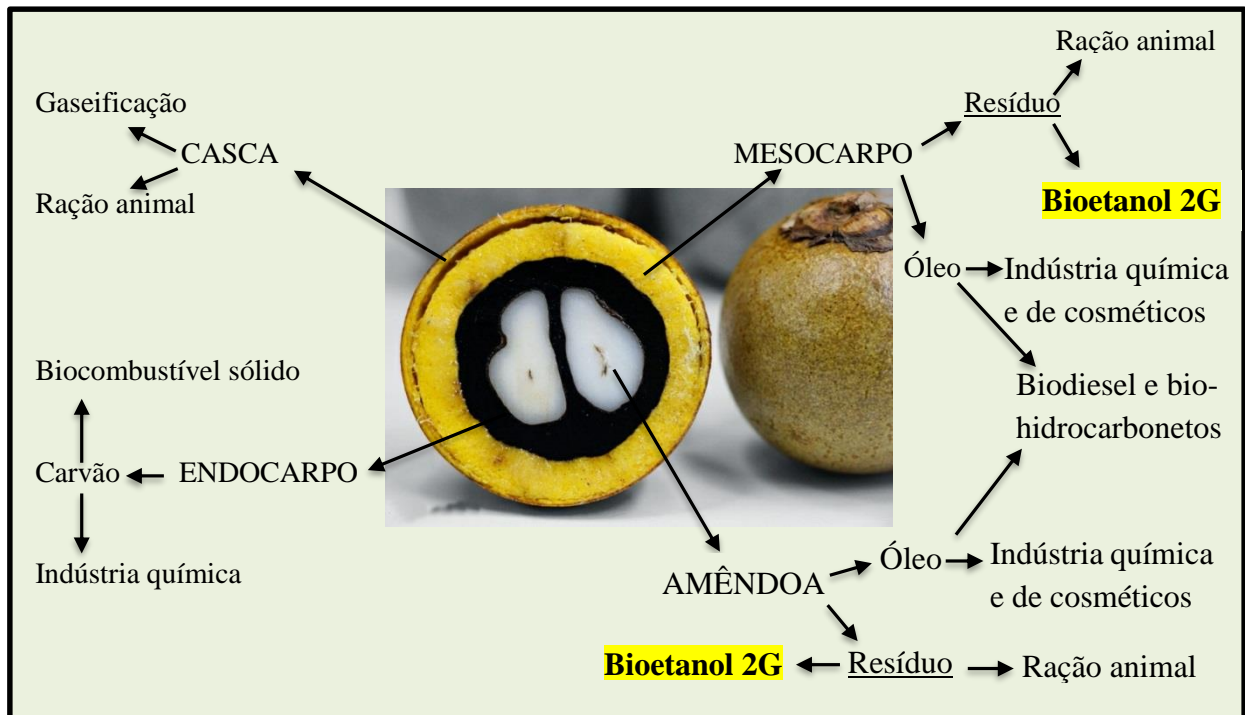
**Figura 2.** Fruto da macaúba (*Acrocomia aculeata*), (A) fruto inteiro, (B) fruto aberto, (C) Proporções relativas entre as partes.

Fonte: Adaptado de Favaro e Miranda, 2013.

Entre os resíduos, a torta de polpa poderia ser usada para a produção de combustíveis gasosos e bio-óleo, por meio de processos termoquímicos (FAVARO; MIRANDA, 2013). Em

teoria, todos os componentes orgânicos da biomassa estão disponíveis para a produção de bio-óleo por meio de conversão termoquímica (CHENG et al., 2020). Os resíduos da polpa da Macaúba poderiam, também, ser usados para produção de etanol de segunda geração (etanol celulósico). É possível, ainda, fazer a separação e fracionamento das fibras para nanocompósitos, dentre outras aplicações (FAVARO; MIRANDA, 2013).

Nessa perspectiva, Moreira, Resende e Pasa (2020), ao se estudar uma rota potencial e sustentável para produção de biodiesel e bioquerosene a partir do óleo da polpa da Macaúba, destacaram, com base na literatura científica (CÉZAR et al., 2015; EVARISTO et al., 2016b; SILVA et al., 2016), as principais destinações das partes do fruto da Macaúba, na forma de figura (Figura 3).



**Figura 3.** A fruta macaúba e suas possíveis aplicações e utilizações.

Fonte: Adaptado de Moreira, Resende e Pasa (2020); Cézar et al. (2015); Evaristo et al. (2016b); Silva et al. (2016).

Avaliando alteração das características físico-químicas do endocarpo da Macaúba por pirólise isotérmica na faixa de 250–550 °C, Duarte et al. (2017) demonstraram, nos resultados, evidências suficientes para a aplicação a longo prazo desta matéria-prima e seus carbonos como combustível sólido ou matéria-prima no processo de gaseificação. No entanto, as características de combustão e as condições de gaseificação ainda precisam ser testadas (DUARTE et al., 2017).

### 3.1.2 Pré-tratamentos usuais e hidrólise enzimática

Não há um pré-tratamento universal para toda a biomassa. Portanto, vários métodos de pré-tratamento foram testados nas últimas décadas, mas cada método ainda tem suas próprias vantagens e desvantagens (ZHANG et al., 2020). Os pré-tratamentos visam romper a parede celular, reduzir o tamanho da partícula das células da biomassa e aumentar a superfície, reduzir a ramificação de alguns materiais fibrosos, solubilizar moléculas recalcitrantes tornando-as biodegradáveis, hidrolisar parcialmente polímeros celulares e/ou desativar materiais tóxicos (CURTI, 2019).

Os principais métodos de pré-tratamentos, propostos na literatura, são aqueles baseados no emprego de álcali, hidrólise ácida, explosão a vapor, água quente, fluido supercrítico, micro-ondas, ultrassom, amônia líquida (AFEX), hidróxido de sódio, solventes orgânicos e, mais recentemente, os solventes eutéticos profundos (DESSs), todos com o propósito de desagregar a estrutura associativa da lignocelulose para produzir combustíveis renováveis ou insumos químicos, a partir da biomassa (TOQUERO; BOLADO, 2014; MANKAR et al., 2021). As rotas mais estudadas e indicadas para a despolimerização de substratos lignocelulósicos têm sido a hidrólise ácida e a hidrólise enzimática, com pré-tratamento físico (explosão a vapor) ou químico (solução de NaOH) (BALAT, 2011). A hidrólise enzimática por (hemi) celulases é a opção preferida devido aos maiores rendimentos de conversão e condições menos corrosivas e tóxicas em comparação com a hidrólise ácida (WEI et al., 2017).

A escolha da tecnologia de pré-tratamento depende de vários fatores, incluindo o tipo de biomassa usada. No entanto, a explosão a vapor é reconhecida como uma das tecnologias mais eficientes e econômicas para pré-tratamento de resíduos agrícolas, particularmente em processos escalonados para produção comercial (SU et al., 2020). Por essa análise, Teixeira et al. (2018) analisaram a eficiência do pré-tratamento por explosão a vapor da fibra do mesocarpo do coco. Em conclusão, o pré-tratamento por explosão a vapor, nas temperaturas de 205 °C e 215 °C, foi mais eficiente para a extração da hemicelulose, independentemente do tempo de residência no reator. Em relação à remoção de lignina, o pré-tratamento proposto mostrou-se pouco eficiente, obtendo uma solubilização máxima de 14,15%, na condição 160 °C com tempo de residência de 10 minutos (TEIXEIRA et al., 2018).

Os pré-tratamentos químicos têm como objetivo o aumento da superfície do substrato por expansão das fibras e a modificação ou remoção das hemiceluloses e/ou da lignina a fim de tornar a celulose mais acessível às enzimas (SANTOS, 2013). Para Sun *et al.* (2016), o pré-tratamento



alcalino é o método mais comumente utilizado para remover lignina e hemicelulose de materiais lignocelulósicos. A lignina é caracterizada como um polímero de rede aromática, composta por unidades de oxifenilpropano unidas por ligações carbono-carbono (C-C) e éter (C-O) (WANG *et al.*, 2018). Durante o pré-tratamento com álcali, as ligações éter nas hemiceluloses e lignina podem ser desfeitas à temperatura relativamente alta. As ligações éster nas hemiceluloses e na lignina são facilmente decompostas em condições alcalinas. As clivagens destas ligações promovem significativamente a solubilização das hemiceluloses e lignina, resultando na exposição de celulose a enzimas (SUN *et al.*, 2016).

Erabi e Goshadrou (2020) estudaram a conversão de resíduos de *Glycyrrhiza glabra*, uma planta herbácea nativa de Portugal, em etanol após tratamento com carbonato de sódio. O pré-tratamento aumentou seletivamente a remoção de lignina, e deixou a celulose intacta. Mais de 94% de rendimento de etanol foi obtido a partir de substrato pré-tratado usando o fungo *Mucor hiemalis*.

Efeitos das estratégias avançadas de pré-tratamento com solventes orgânicos (organosolvs) nas propriedades estruturais da biomassa lenhosa foram estudados por Meng *et al.* (2020). Não foram encontradas diferenças distintas na morfologia da parede celular entre os pré-tratamentos com organosolv avaliados. Todos os pré-tratamentos levaram a delaminação e mudanças na forma das paredes celulares devido à alta remoção de lignina e altas temperaturas de pré-tratamento (MENG *et al.*, 2020). Segundo estes autores, as características estruturais da lignina obtidas através do pré-tratamento com organosolv dependem fortemente da seleção de solvente, condições de pré-tratamento, adição de proteção / reagente de captura e tipos de biomassa.

A maioria dos solventes orgânicos são caros, o que é um fator importante para aplicações industriais. Álcoois de baixo peso molecular, como etanol e metanol, com baixos pontos de ebulição são favorecidos entre todos os possíveis solventes. Portanto, esse processo de pré-tratamento com organosolve é um método promissor (CHEN *et al.*, 2017).

Timung *et al.* (2015) estudaram o bagaço de cana-de-açúcar e o bambu, abundantes na região nordeste da Índia, como potenciais candidatos para a produção de biocombustíveis na região citada. Eles mencionaram a carga de biomassa, temperatura e tempo de operação como os principais fatores que afetam o rendimento de açúcares redutores totais (ART) nos processos de pré-tratamento com ácido diluído e água quente (TIMUNG *et al.*, 2015). Estes autores relataram que, independentemente do tipo de biomassa, no processo de pré-tratamento com água quente foram produzidos mais açúcares do que no processo de pré-tratamento com ácido.

Ao se estudar os efeitos de diferentes métodos de pré-tratamento na composição química do bagaço de cana-de-açúcar e na hidrólise enzimática, Gao *et al.* (2013) realizaram diferentes combinações de pré-tratamento, sendo: água superaquecida (LHW) e hidróxido de sódio (NaOH 1 % m/v). O pré-tratamento de NaOH conseguiu remover 78 % de lignina e reter a maior parte da glicose. Já o pré-tratamento de LHW solubilizou mais de 82 % de xilose e 42 % de lignina. A sequência de dois processos, para pré-tratamentos combinados, teve um efeito significativo sobre a composição química, característica do substrato e o subsequente processo de hidrólise enzimática. O pré-tratamento combinado (LHW-NaOH) pode solubilizar mais de 92 % de xilose e remover 76 % de lignina, além de recuperar 73 % de açúcar total após 72 h de hidrólise enzimática (GAO *et al.*, 2013). Em comparação, o pré-tratamento com NaOH removeu 85% da lignina em biomassa de capim elefante BRS Capiáçu, semelhante ao pré-tratamento com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> que mostrou alto desempenho na remoção da lignina, com taxa de remoção de lignina de 87,89% (GODINHO *et al.*, 2019).

Em outro estudo, Santos *et al.* (2014), analisando o pré-tratamento hidrotérmico na palha de cana-de-açúcar, chegaram à conclusão de que os ensaios do planejamento experimental com temperaturas de 190 e 210 °C proporcionaram maior rendimento de hidrólise da celulose, chegando a valores próximos de 100%, mostrando a eficiência do pré-tratamento hidrotérmico sobre a recalcitrância da palha de cana-de-açúcar e seu potencial na produção de etanol celulósico.

Já Ngamsirisomsakul *et al.* (2019) utilizaram o pré-tratamento hidrotérmico e hidrólise enzimática na biomassa de *Chlorella sp.* para produção de bioetanol. Eles relataram o potencial de *Chlorella sp.*, uma microalga verde, como matéria-prima alternativa para a produção de etanol. Sua biomassa poderia ser usada para produzir até aproximadamente 11 g / L de etanol após pré-tratamento hidrotérmico ácido e hidrólise enzimática usando apenas glucoamilase (NGAMSIRISOMSAKUL *et al.*, 2019).

Hamraoui *et al.* (2020) avaliaram a influência do pré-tratamento hidrotérmico a 120 °C e diferentes tempos na solubilização e na degradabilidade de dois resíduos sólidos agrícolas, Pimenta e Berinjela. A avaliação mostrou que o tempo de pré-tratamento mais adequado foi de 40 min para ambos os substratos. Contudo, o teste de biodegradabilidade mostrou menor biodegradabilidade aeróbia de substratos pré-tratados, o que pode ser uma consequência da inibição microbiana derivada do saneamento causado pelo pré-tratamento hidrotérmico. Neste estudo, a combinação de

um pré-tratamento hidrotérmico e a co-digestão com resíduos de Pimenta e Berinjela apresentou sinergia positiva para a produção e estabilidade de metano (HAMRAOUI *et al.*, 2020).

Barua e kalamdhad (2016), avaliando o efeito de vários tipos de técnicas de pré-tratamento térmico na hidrólise, análise composicional e caracterização de Aguapé (planta aquática), relataram que o pré-tratamento em forno de ar quente a 90 ° C por 1 h interrompeu as ligações químicas do complexo estrutural lignocelulósico, liberando, assim, biopolímeros extracelulares e intracelulares na fase solúvel.

Utilizando os tratamentos com autoclave e ultra-som, Abdullah *et al.* (2016) concluíram que a extração verde de celuloses puramente extraídas de cachos vazios de dendê foi desenvolvida com sucesso. A extração de celulose requer a abertura e quebra de ligações químicas como as aromáticas, -OH, C-C, R-O-R das ligninas e a ligação H- R-COO-R e R-O-R das hemiceluloses ou celuloses (ABDULLAH *et al.*, 2016).

Estudando dois pré-tratamentos (ácido e alcalino) e otimização de processos de energia limpa através da liquefação da vagem de cacau (*Theobroma cacao*), Dahunsi, Adesulu-Dahunsi e Izebere (2019) relataram que o pré-tratamento com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> desconstruiu a vagem de cacau removendo 71% do teor de lignina. A vagem de cacau pré-tratada com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> produziu 71% mais biogás que o tratamento ácido (DAHUNSI; ADESULU-DAHUNSI; IZEBERE, 2019).

Assumpção *et al.* (2016), ao pesquisar pré-tratamento combinado (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NaOH) para obtenção das frações lignocelulósicas do bagaço da cana-de-açúcar, utilizaram metodologias de forma a minimizar custos operacionais com redução da temperatura e do tempo de reação. As etapas de caracterização química das frações lignocelulósicas foram realizadas por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) a fim de determinar a composição química do bagaço, assim como fornecer resultados quantitativos das frações mássicas de lignina e hemicelulose removidas durante a etapa de pré-tratamento. As técnicas de fibra detergente ácido (FDA), fibra detergente neutro (FDN) e lignina detergente ácido (LDA) também foram utilizadas para a quantificação dos componentes majoritários do bagaço *in natura* (ASSUMPCÃO *et al.*, 2016).

Um processo hidrotérmico para dissolver a lignocelulose, que pode ser usado em resíduos agrícolas típicos, como palha de milho, e recuperar os oligômeros solúveis para posterior refino, foi proposto por Yuan *et al.* (2016). O trabalho apresentou uma solução de mistura (água / etanol / ácido sulfúrico / peróxido de hidrogênio) para a dissolução da palha do milho. O efeito do peróxido de hidrogênio na dissolução da palha de milho foi investigado. O peróxido de hidrogênio exibiu

um efeito significativo de intensificação na dissolução da hemicelulose, descristalização da celulose e deslignificação com ácido sulfúrico. Além disso, a lignina foi degradada em fragmentos, no decorrer da dissolução, que tinham uma estrutura mais solta e de menor peso molecular (YUAN et al., 2016).

Cao *et al.* (2012) ressaltaram o pré-tratamento com solução de NaOH diluído e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por imersão em autoclave como o mais adequado método para pré-tratamento de bagaço de sorgo sacarino. Em suas análises, algumas mudanças significativas na estrutura e nas ligações químicas após pré-tratamento foram encontradas. O maior rendimento de hidrólise de celulose foi de 74,29%, sendo 5,88 vezes maior que o controle. O teor de celulose e rendimento total de açúcar, concentração de glicose, rendimento de hidrólise de celulose e concentração de etanol estavam relacionados (CAO *et al.*, 2012).

Mota et al. (2019) mostraram o potencial da palha de milho, bagaço de cana e casca de eucalipto como fontes de açúcares fermentescíveis para produção de bioetanol após o pré-tratamento com peróxido de hidrogênio-ácido acético (HPAC). O pré-tratamento HPAC removeu com eficiência a lignina (45 a 75%) de materiais lignocelulósicos com diferentes tipos de parede celular. A deslignificação expôs celulose e hemicelulose, levando à sacarificação mais eficiente de materiais lignocelulósicos, sem acúmulo de furfurais, que são inibidores de fermentação do etanol realizada por leveduras. Com base nos resultados, o pré-tratamento HPAC pode ser aplicado em matérias-primas com diferentes tipos de parede celular com foco na produção de etanol celulósico. Em conjunto, essas descobertas sugerem que o tratamento HPAC é uma estratégia valiosa para diminuir os custos do processamento de bioetanol de segunda geração na indústria (MOTA et al., 2019).

Em um artigo de revisão, Ho, Ong e Wu (2019) argumentaram uma desvantagem em se utilizar o peróxido de hidrogênio alcalino (PHA). É necessário um tempo de residência mais longo para alcançar a deslignificação satisfatória de biomassa. No entanto, a utilização do pré-tratamento sequencial com PHA é uma nova abordagem para compensar uma limitação individual do pré-tratamento. O pré-tratamento sequencial - PHA é capaz de extrair vários produtos, como a sílica e lignina. Por último, os autores relataram que a instalação de um fluxo de reciclagem para recuperar o produto químico gasto é necessária para reduzir o custo de produção de bioetanol. Portanto, estudos mais aprofundados sobre a viabilidade de estratégias de pré-tratamento sequencial, estudo de reciclabilidade e aumento de escala do processo usando PHA são necessários para contribuir

para um novo capítulo em biorrefinaria, usando biomassa lignocelulósica como matéria-prima sustentável (HO; ONG; WU, 2019).

Avaliando os efeitos do pré-tratamento com PHA em coníferas (Abeto de Douglas), a baixas cargas de peróxido, sobre a hidrolisabilidade do substrato, Alvarez-Vasco e Zhang (2017) demonstraram que a presença de uma pequena quantidade de peróxido de hidrogênio é essencial para o pré-tratamento eficaz do Abeto de Douglas por álcali. Substrato com 95% de rendimento de celulose em glicose foi obtido a partir do tratamento com PHA.

O peróxido de hidrogênio também foi usado para otimizar a eficiência do pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar por explosão a vapor, com base no aumento das concentrações de açúcares fermentescíveis após hidrólise enzimática. Neste trabalho, Verardi et al. (2018) investigaram duas diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio (0,2% e 1%). Ao adicionar peróxido de hidrogênio no pré-tratamento a vapor, o rendimento médio aumentou em 12% para glicose e até 34% para xilose, enquanto que o rendimento de celobiose diminuiu cerca de 30%. O uso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, aparentemente, não aumentou a formação de compostos inibidores liberados durante o pré-tratamento por explosão a vapor, com exceção da concentração de ácido levulínico (VERARDI et al., 2018).

Para avaliar o efeito do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino na deslignificação do bagaço de *Agave tequilana*, Galindo-Hernández et al. (2018) utilizaram dois tempos de reação, 1,5 ou 6 h. Observou-se que após 1,5 h, 97% da lignina estava removida e 88% da holocelulose foi recuperada. Neste trabalho, o processo de deslignificação com peróxido de hidrogênio alcalino contribuiu para a obtenção de frações de celulose e hemicelulose para um subsequente ataque enzimático. Aplicando uma mistura de celulasas e hemicelulasas, o rendimento e produtividade de sacarificação aumentou em 2 vezes, devido à sinergia alcançada com ambas as enzimas. Em resumo, a integração de uma etapa de pré-tratamento de deslignificação juntamente com o uso de misturas enzimáticas sinérgicas para sacarificação de bagaço de agave pode ser de grande relevância para o aproveitamento desse resíduo lignocelulósico para a produção de biocombustíveis (GALINDO-HERNÁNDEZ et al., 2018).

Em síntese, Kumar e Sharma (2017) realizaram uma extensa pesquisa sobre o desenvolvimento de várias técnicas de pré-tratamento para deslignificação de biomassa. No entanto, a análise crítica dos métodos de pré-tratamento levou a uma conclusão de que o método de pré-tratamento é um processo "personalizado" para cada indivíduo de biomassa que deve ser

meticulosamente selecionado e planejado com base nas suas propriedades características (KUMAR; SHARMA, 2017). Cada método induz a diferentes efeitos em diferentes tipos de biomassa lignocelulósica. (VU et al., 2020). Portanto, há uma necessidade urgente de redesenhar as estratégias de pré-tratamento existentes ou desenvolver uma abordagem de pré-tratamento universal para a utilização de diferentes biomassas e facilitar a produção em larga escala de biocombustíveis e produtos de valor agregado (KUMAR et al., 2020).

Enfim, o sucesso na identificação e aplicação de pré-tratamento eficaz para biomassa lignocelulósica pode resolver problemas globais envolvendo sustentabilidade energética e desenvolvimento (VU et al., 2020). Nesta abordagem, a investigação da condição de pré-tratamento é o principal objetivo dos cientistas para produzir bioenergia de alto rendimento e de forma econômica (REZANIA et al., 2020). Por isso, pode-se afirmar que o desenvolvimento de métodos de pré-tratamento eficazes, mas acessíveis, é a chave para reduzir o custo de conversão de biomassa (TANG et al., 2019).

Após o pré-tratamento, a celulose e as hemiceluloses armazenadas na biomassa podem ser hidrolisadas em açúcares monoméricos (WEI et al., 2017). A sacarificação de polímeros de celulose e hemicelulose de biomassa pré-tratada é a etapa mais crucial, afetando significativamente a economia do processo de bioconversão. Sacarificação por hidrólise enzimática é considerada uma abordagem eficaz, específica, viável e ecológica em relação à hidrólise não enzimática. Além disso, a hidrólise da matéria-prima celulósica mediada por celulasas não gera inibidores (PATEL; SHAH, 2021). Mas, durante a etapa de hidrólise, a presença de hemicelulose leva à formação de pentoses, que são derivados menos fermentescíveis do que a glicose da celulose (SU et al., 2020).

Os principais benefícios do desempenho da hidrólise enzimática junto com o processo de fermentação, processo este denominado de Sacarificação e Fermentação Simultâneas (SSF), é a redução da inibição do produto final da hidrólise enzimática e a redução do custo de investimento (SUDIYANI et al., 2019). Nogueira, Padilha e Santos (2021) estudaram a hidrólise enzimática e a SSF da fibra de coco verde (FCV) sob altas concentrações de polímeros à base de óxido de etileno. Os resultados sugeriram que a adição de polímeros à base de óxido de etileno pode substituir os pré-tratamentos, o que poderia reduzir significativamente a demanda de água, energia e reagentes no processo de produção de etanol celulósico da FCV (NOGUEIRA; PADILHA; SANTOS, 2021).

O processo de Hidrólise e Fermentação Separadas (SHF) tem potencial e limitações. A principal vantagem do processo SHF é a possibilidade de otimizar separadamente as etapas do

processo, especialmente por ser possível executar a hidrólise enzimática em uma temperatura ideal (SUDIYANI et al., 2019). Além disso, o processo SHF permite reciclar levedura da fermentação, o que não é o caso de outras alternativas (SU et al., 2020). As dificuldades de fermentação juntamente com a inibição do produto final são duas limitações do processo SHF que devem ser melhoradas (SUDIYANI et al., 2019).

Ainda considerando o processo de hidrólise, Wu et al. (2021) avaliaram a aplicação de Moinho de bolas intermitente na hidrólise enzimática para conversão eficiente de biomassa lignocelulósica em glicose. Para construir um sistema de hidrólise enzimática atualizado, os autores consideraram que a introdução do moinho de bolas intermitente no processo de hidrólise enzimática no estado sólido deve ser vantajosa na redução do consumo de energia, devido ao encurtamento do tempo de processamento. Por conseguinte, uma nova hidrólise enzimática no estado sólido em moinho de bolas intermitente foi desenvolvida e os efeitos de diferentes parâmetros foram investigados. O processo de moagem em moinho de bolas melhora a clivagem enzimática da biomassa celulósica pré-tratada, apresentando-se com um tempo de processamento três vezes menor. De forma específica, os rendimentos de glicose após 24 h de hidrólise de biomassa em moinho de bolas intermitente foram comparáveis a aqueles derivados após 72 h de hidrólise típica no estado líquido (WU et al., 2021).

Paz-Cedeno et al. (2021) realizaram a hidrólise enzimática de bagaço de cana pré-tratado (BCP) usando o biocatalizador GO-MNP-Enz (enzima apoiada por óxido de grafeno magnético). No total, foram produzidos 21 mg de glicose e 20 mg de xilose a partir de 100 mg de BCP após 10 ciclos de hidrólise (10 mg de BCP por ciclo). Ao todo, o biocatalisador apresentou um desempenho satisfatório, especialmente para hidrólise de xilano, e é adequado para um processo de reutilização de baixo custo. Assim, o uso do GO-MNP-Enz se mostrou uma estratégia econômica para a hidrólise mais competitiva do BCP (PAZ-CEDEÑO et al., 2021).

Diante do exposto, avaliar os efeitos dos pré-tratamentos com peróxido de hidrogênio alcalino e com água destilada, sobre as biomassas lignocelulósicas: fibra do mesocarpo + casca e torta da amêndoa da Macaúba, torna-se pertinente para averiguação de aumento dos coeficientes de hidrólises enzimáticas fibrolítica e amilolítica dos resíduos extrusados, considerando a praticidade, tecnologias e baixo custo de aplicação no Brasil. Com efeito, avaliar essas variáveis torna-se relevante no contexto da Agroenergia, haja vista o grande volume de resíduos gerados no processo de extração de óleo.

### 3.1.3 Etanol de segunda geração

Os primeiros biocombustíveis a serem desenvolvidos foram o bioetanol, obtido inicialmente a partir de amido e açúcares, e o biodiesel, obtido a partir de gorduras e óleos. No entanto, a difusão desses produtos, os chamados biocombustíveis de primeira geração, tem sido limitada por causar competição direta entre os biocombustíveis e produção de alimentos (YOUSUF; PIROZZI; SANNINO, 2020). Soma-se a isso, o aumento da demanda por etanol, principalmente na seção de transporte. Portanto, é necessário encontrar matérias-primas alternativas ou outras matérias-primas que possam substituir ou complementar os materiais atuais para garantir o fornecimento de matérias-primas para a indústria de etanol (NGAMSIRISOMSAKUL *et al.*, 2019).

Mais recentemente, os biocombustíveis de segunda geração foram desenvolvidos, com base na conversão de componentes da biomassa lignocelulósica em combustíveis líquidos (YOUSUF; PIROZZI; SANNINO, 2020). Para isso, existem duas rotas principais para a produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica: termoquímica e biológica. Comparativamente, a conversão biológica é um método comumente usado para produzir etanol, devido à sua alta eficiência e seletividade de conversão (WANG *et al.*, 2020).

A produção de bioetanol é um dos principais exemplos de conceitos de biorrefinaria (GANGULY *et al.*, 2020). Essa produção realizada a partir de biomassa lignocelulósica foi relatada por Wang *et al.* (2020). Estes mesmos autores relataram, ainda, que o desenvolvimento de veículos flex impulsionou o uso de bioetanol. Nesse contexto, uma biorrefinaria lignocelulósica integrada tem um alto potencial para fornecer etanol 2G a um preço competitivo para o usuário final, conjugando a produção em massa de produtos de valor agregado como oligossacarídeos, etc. (PATEL; SHAH, 2021).

Ainda existem vários desafios que bloqueiam o progresso industrial para uma produção de etanol 2G econômica e comercial. Entre os principais desafios está o processo de fermentação (PATEL; SHAH, 2021). A natureza do microrganismo usado na fermentação e as características de uma enzima são os fatores decisivos para a escolha do modo de fermentação para a produção de bioetanol (KHAIRE; MOHOLKAR; GOYAL, 2021). A técnica de fermentação utilizada também é igualmente importante para a comercialização da produção de etanol (DEVI *et al.*, 2021). De acordo com Su *et al.* (2020), uma fermentação eficiente de pentoses reduz o custo de produção do etanol.



Para melhorar a produtividade e o rendimento do etanol, o processo de desintoxicação é necessário. A desintoxicação do hidrolisado pode ser feita por diferentes métodos, como físico (evaporação, separação por membrana), físico-químico (excesso de cal, adsorção em carvão ativado, extração de solvente, resina de troca iônica) e biológico (enzimas peroxidase e lacase, evolução adaptativa, e engenharia genética) (DEVI et al., 2021).

Tinôco, André Genier e Batista da Silveira (2021) investigaram a valorização da tecnologia de produção de etanol celulósico a partir do bagaço de sorgo sacarino por *Kluyveromyces marxianus* CCT 7735. Foram estudadas três temperaturas: 37, 42 e 45 ° C. Como resultado, cerca de 17,83 g / L de etanol celulósico foi atingido a 42 ° C em 24 h, com rendimento de 2769,8 L / ha de sorgo. Conforme esses autores, a valorização da tecnologia indicou o potencial do bagaço de sorgo sacarino na produção de etanol em biorrefinaria.

Em termos de sustentabilidade, Nakasu et al. (2021) avaliaram o consumo de água da pós-lavagem do bagaço de cana após o pré-tratamento com líquido iônico prótico e seu impacto na produção de etanol 2G. Os autores consideraram a tecnologia de pré-tratamento eficaz e mais sustentável em relação ao consumo de água para a produção de etanol 2G.

A tabela abaixo (Tabela 5) apresenta a produção de etanol de diferentes biomassas lignocelulósicas, com destaque (em negrito) para as biomassas trabalhadas no prédio do curso de Mestrado em Agroenergia da Universidade Federal do Tocantins (UFT).

**Tabela 5.** Produção de etanol de diferentes biomassas lignocelulósicas.

Biomassa	Pré-tratamento	Rendimento	
		Etanol 2G (L/t)*	Referência
<b>Capim Elefante</b>	ácido/básico	114,41 <sup>a</sup>	Glória et al., 2020
<b>Sorgo biomassa</b>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> alcalino	56,37 <sup>1</sup>	Sousa, 2020
<b>Capim Elefante</b>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> alcalino	113,37 <sup>1</sup>	Júnior, 2018
<b>Convert HD364</b>	ácido/básico	148,56 <sup>1a</sup>	Batista, 2016
<b>Convert HD364</b>	ácido/básico	351,66 <sup>1</sup>	Santos, 2016
<b>Rama de batata-doce</b>	ácido/básico	37,42 <sup>1</sup>	Mairesse, 2015
Bagaço de cana <sup>b</sup>	[MEA][OAc] <sup>c</sup>	299	Nakasu et al., 2021
Capim Elefante	KOH	124,20 <sup>1</sup>	Bensah; Kádár; Mensah, 2019
Palha de cevada	Explosão a vapor	177,44 <sup>1</sup>	Álvarez et al., 2018

Cânhamo industrial	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> alcalino	221,80 <sup>1</sup>	Kuglarz et al., 2016
--------------------	--	---------------------	----------------------

\* Litro por tonelada de matéria seca; <sup>a</sup> Matéria seca pré-tratada; <sup>1</sup> Valor aproximado convertido do original; <sup>b</sup> Bagaço não moído (7% em peso de teor de umidade); <sup>c</sup> Acetato de monoetanolamônio PIL(Líquido iônico prótico).

Há várias tecnologias de pré-tratamento disponíveis, sendo que o processo de pré-tratamento é um parâmetro crítico que controla o custo geral de uma biorrefinaria. Diferentes inibidores produzidos devido a diferentes tecnologias de pré-tratamento têm efeito prejudicial no crescimento de microorganismos (DEVI et al., 2021). Para estes autores, há uma necessidade urgente de um processo de produção de etanol de baixo custo que possa ser aplicado a diferentes tipos de biomassa, produzindo menos inibidores junto com maior rendimento de etanol e produção em larga escala.

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1 Local de trabalho e preparo das amostras

O estudo foi conduzido no Laboratório de Análise de Solos e Resíduos Agroindustriais (LASOR) da Universidade Federal do Tocantins (UFT) vinculado ao Mestrado em Agroenergia, em Palmas – TO. Nesse local, as biomassas extrusadas (resíduos advindos do processo de extração de óleo), fibra do mesocarpo + casca (Meso + Casca Ext) e torta da amêndoa (Amêndoa Ext) da Macaúba, cedidas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 55 °C, por 72 horas. Após a secagem do material, houve o processo de moagem utilizando moinho de facas acoplado com peneira de 1 mm.

As biomassas casca e mesocarpo (Meso + Casca Ext) foram associadas como uma alternativa para que a extrusora da indústria da UFV conseguisse retirar o óleo do mesocarpo, não sendo possível seu processamento isoladamente com o equipamento atual da indústria da referida instituição.

### 4.2 Parâmetros e tratamentos

As concentrações de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina, hemicelulose e celulose, nas biomassas antes dos pré-tratamentos, foram caracterizadas. Ademais, quantificou-se o coeficiente de hidrólise da fibra (CH<sub>Fibra</sub>), coeficiente de hidrólise do amido (CH<sub>Amido</sub>), concentração de glicose e estimou-se a produção de etanol celulósico.

Os tratamentos avaliados foram os efeitos dos pré-tratamentos com peróxido de hidrogênio alcalino (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), na concentração de 5% (v/v), e com água destilada (H<sub>2</sub>O), sobre os coeficientes

de hidrólise enzimática celulolítica e amilolítica das biomassas (Meso + Casca Ext e Amêndoa Ext) da Macaúba, sendo utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x2, com 5 repetições, totalizando 20 parcelas experimentais.

O uso da concentração de 5% (v/v) de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> justifica-se pelo fato de as biomassas (Meso + Casca Ext e Amêndoa Ext) da Macaúba conterem, ainda, após o processo de extrusão, teores relevantes de óleo residual; isso significa que, em concentrações menores, não se verificou efeitos significativos na desestruturação da parede celular, sendo necessária, portanto, uma maior concentração de peróxido de hidrogênio.

Conforme Ho, Ong e Wu (2019), o peróxido alcalino é um reagente relativamente “verde” com baixo impacto ambiental, e que pode ser facilmente decomposto para produzir água e oxigênio como produtos finais. Ainda, segundo esses autores, vários estudos também revelaram que os pré-tratamentos com peróxido de hidrogênio alcalino foram altamente compatíveis com a hidrólise enzimática para produzir grandes quantidades de açúcares.

### **4.3 Caracterização das biomassas**

#### **4.3.1 Concentração de FDN, FDA e hemicelulose**

Foram determinados os teores de FDN, FDA e Hemicelulose, seguindo o método de Van Soest, Robertson e Lewis (1991), que consiste na separação das várias frações da biomassa por meio de reagentes específicos denominados detergentes. Para determinação de FDN foi feita adaptação analítica, onde inicialmente se pesou 0,5 grama de amostra seca de cada tratamento, que passou por processo de lavagem em 20 ml de solução de fibra em detergente neutro, por 120 minutos à temperatura de 100 °C, no equipamento Banho-Maria. Após o processo, a amostra resultante foi filtrada utilizando bomba de vácuo e, posteriormente, submetida à secagem em estufa de ventilação forçada a 60 °C até massa constante, com posterior pesagem. Para determinação de FDA, utilizou-se a mesma marcha citada anteriormente para FDN, diferenciando apenas na quantidade de amostra de cada tratamento utilizada no processo, que passou a ser 1 grama, e a solução utilizada para a lavagem, passando a ser detergente ácido. A diferença entre os teores obtidos para FDN e FDA determinou o teor de hemicelulose.

#### 4.3.2 Determinação da Lignina, celulose, amido hidrolisável e extrato etéreo

Aplicou-se o método “Klason” para determinação do teor de lignina das biomassas, conforme descrito por Silva & Queiroz (2012). Os cadinhos filtrantes foram previamente secos a 100 °C em estufa durante a noite e posteriormente pesados. Em seguida, colocou-se 0,5g de resíduo do FDA em cada cadinho filtrante e os mesmos foram colocados em recipientes individuais da mesma altura dos cadinhos. Adicionou-se 15 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 72% em cada cadinho filtrante para umedecer o conteúdo, repetindo-se esse processo por três vezes, até que a quantidade de ácido no recipiente estivesse igual à quantidade de ácido presente no interior do cadinho, de forma que o resíduo ficasse todo submerso.

Após a digestão, os cadinhos foram filtrados sob vácuo até esgotar. Logo, o resíduo foi lavado com água quente até que todo vestígio do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fosse removido. Em seguida, os cadinhos foram levados à estufa overnight a 65 °C, onde ficaram por 8 horas. Após esse período, os cadinhos foram pesados e posteriormente levados à mufla, permanecendo durante 5 horas a 550 °C, para que fosse realizada a determinação do teor de cinzas.

Em consequência, a determinação da lignina se deu pela equação 01.

$$Lignina (\%) = \left( \frac{Pf - Pc}{Pr} - cinzas \right) \times 100 \quad \text{Equação 01}$$

Onde: Pf = Peso do cadinho + resíduo (final);

Pc = Peso do cadinho;

Pr = Peso do resíduo (inicial);

Com a determinação da lignina, foi possível, então, determinar o percentual de celulose pela equação 02.

$$Celulose (\%) = \% FDA - \% Lignina \quad \text{Equação 02}$$

As variáveis amido hidrolisável e extrato etéreo foram determinadas por meio de procedimentos analíticos descritos por Silva & Queiroz (2012).

#### 4.4 Produção de Etanol

#### 4.4.1 Pré-tratamentos das biomassas em estudo

O pré-tratamento químico ( $H_2O_2$ ) (5% v/v), das biomassas lignocelulósicas, foi realizado em mesa agitadora modelo Solab, por 24 horas, a 150 rpm e 25 °C (KRISHNA, 2000). Para isso, foram adicionados 10g da amostra seca em erlenmeyer de 125 mL e acrescido 100 mL de  $H_2O_2$ , retificado o pH para 11,5 com hidróxido de sódio (NaOH). Após 24 horas decorridas, o material foi filtrado em papel filtro, de peso conhecido, com auxílio de bomba de vácuo (200 watts) e uso de um kitassato (2000 ml). Depois de filtrado, o material retido em filtro foi levado à estufa, mantendo-se por 24 horas a 60 °C. Logo depois, o papel filtro com a amostra foi retirado da estufa e levado ao dessecador por 30 minutos e em seguida pesado.

O pré-tratamento com água destilada ocorreu nas mesmas condições de agitação do pré-tratamento anterior. Para esse fim, foram adicionados 10g da amostra seca em erlenmeyer de 125 mL e acrescido 100 mL de  $H_2O$ . Decorridas as 24 horas, procedeu-se da mesma forma do pré-tratamento com  $H_2O_2$ .

#### 4.4.2 Hidrólise enzimática

Após os pré-tratamentos, o material residual fibroso foi submetido à hidrólise enzimática utilizando o complexo enzimático Cellic CTec2 batelada VCNI0013 da empresa Novozymes. O complexo citado é uma mistura de celulasas agressivas, com alto percentual de  $\beta$ -glucosidase e hemicelulase, composição esta que promove a conversão de carboidratos complexos em açúcares simples antes da fermentação (NOVOZYMES, 2015).

Para a hidrólise dos carboidratos fibrosos, o meio reacional compôs-se de 0,83g do substrato, 50  $\mu$ L do complexo enzimático Cellic CTec2 diluído em 40 mL de solução tampão (citrato de sódio/fosfato de sódio) com pH ajustado para 5, em Erlenmeyer de 125 ml. As reações enzimáticas ocorreram em mesa agitadora modelo Solab a 48 °C, agitação de 150 rpm, durante 72 horas. A dose de Cellic CTec2 correspondeu a 6% da fibra presente em cada substrato pré-tratado (NOVOZYMES, 2015).

Depois de decorridas 72 horas, o material foi filtrado em papel filtro, de peso conhecido, usando bomba de vácuo (200 watts) com auxílio de Kitassato (2000 ml), no qual estava acoplado o funil de Büchner. O volume final da solução foi medido com auxílio de uma proveta (100 ml). A fração líquida foi armazenada em tubos tipo Falcon (15 ml). Após as filtrações, as amostras retidas nos papéis filtros foram colocadas em bandeja e levadas à estufa, onde permaneceram por 24 horas a 60 °C. Após a secagem, as amostras foram pesadas, a fim de se obter o peso final pós-hidrólise.

Assim, determinou-se o coeficiente de hidrólise da fibra ( $CH_{\text{Fibra}}$ ) pela diferença entre o peso das amostras pré-tratadas antes da hidrólise e o peso obtido pós-hidrólise enzimática.

Para a efetuação da hidrólise do amido, foram pesadas 1g de amostra de cada tratamento (seca e moída), sendo posteriormente acondicionada em tubo de ensaio de 100 mL. A este tubo foi adicionado 40 mL de solução tampão (citrato de sódio/fosfato de sódio; pH=5) e então foi acrescentada a todos os tratamentos a enzima  $\alpha$ -amilase (Liquozyme® Supra 2.2x) na concentração de 30  $\mu\text{l/g}$  de amostra; posteriormente os tubos foram levados ao banho-Maria Dubnoff – SL 157 (Solab). Este equipamento teve a temperatura ajustada para 90 °C gradualmente a uma rotação de 180 rpm/min durante 2 horas. Após esta etapa, o meio foi resfriado até 60 °C e nesta temperatura foi adicionada a enzima sacarificante amiloglucosidase (AMG 300L) na concentração de 40  $\mu\text{l/g}$  de amostra, onde ficou em processo por mais 3 horas (NOVOZYMES, 2002).

Cabe ressaltar que a metodologia descrita acima foi adaptada e fundamentada segundo informações do fabricante (NOVOZYMES, 2002).

Finalizado o processo de hidrólise, o material foi filtrado com ajuda de uma bomba de vácuo (200 watts), ajustada ao funil de Büchner, no qual estava acoplado ao Kitassato (2000 ml). Utilizou-se papel filtro de peso conhecido. O volume final da solução foi medido com auxílio de uma proveta (100 ml). Após as filtrações, a fração líquida foi armazenada em tubos tipo Falcon (15 ml) e as amostras retidas nos papéis filtros foram colocadas na bandeja e levadas para estufa a 50 °C por 24 horas, sendo posteriormente pesadas, a fim de se obter o peso final pós-hidrólise.

Assim, o coeficiente de hidrólise do amido ( $CH_{\text{Amido}}$ ) foi obtido pela diferença entre o peso das amostras pré-tratadas antes da hidrólise e o peso obtido pós-hidrólise enzimática.

Para fins de análise, o  $CH_{\text{Fibra}}$  e o  $CH_{\text{Amido}}$  foram expressos em porcentagem.

Tanto na hidrólise enzimática dos carboidratos fibrosos quanto na do amido foram utilizados tubos sem adição dos complexos enzimáticos (Branco), a fim de permitir quantificar as frações solúveis sem o efeito hidrolítico das enzimas.

#### 4.4.3 Estimativa da produção de etanol celulósico

O mosto hidrolisado e filtrado dos carboidratos fibrosos foi submetido à CLAE (marca-Agilent, modelo 1260 infinity II), usando a coluna cromatográfica Supelcogel C-610H (30cm x 7.8mm) – Sigma-Aldrich, pré-coluna Supelguard C610H (5cm x 4,6mm) – Sigma-Aldrich e um detector de índice de refração a 40 °C, para determinar a concentração de açúcares livres. O método cromatográfico utilizado correspondeu à metodologia do manual de aplicações da

Phenomenex. Os açúcares fermentescíveis foram considerados para quantificar a produção de etanol usando a equação de Gay-Lussac, que estabelece que a cada 100 Kg de açúcares redutores totais (ART), produz-se 46,49 kg do biocombustível etanol (FINGUERUT *et al.*, 1985).

#### 4.5 Análises estatísticas

Aplicou-se o programa SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2020) para realização das análises estatísticas. Os dados das variáveis estudadas foram submetidos ao teste Shapiro-Wilk, para verificação da normalidade dos dados, e posteriormente foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 5% de significância. As médias dos tratamentos foram comparadas entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância.

### 5. Resultados e Discussão

#### 5.1 Caracterização das biomassas

As biomassas extrusadas (*in natura*), elencadas neste trabalho como fibra do mesocarpo mais casca (Meso + Casca Ext) e torta da amêndoa (Amêndoa Ext) da Macaúba, foram caracterizadas no LASOR (Tabela 6). Após aplicação dos pré-tratamentos, as biomassas foram avaliadas, a fim de verificar a influência dos pré-tratamentos na desestruturação da parede celular.

**Tabela 6.** Caracterização das biomassas antes dos pré-tratamentos.

Parâmetros	Meso+Casca Ext	Amêndoa Ext
	(1:1)	
FDN (% MS)	26,40	31,0
FDA (% MS)	18,80	22,15
Celulose (%MS)	2,70	8,63
Hemicelulose (% MS)	7,6	8,85
Lignina (% MS)	16,1	13,52
Amido hidrolisável (%MS)	6,17	0,48
Extrato Etéreo (% MS)	18,38	17,25

Resultados obtidos por meio de análises realizadas no laboratório LASOR – UFT.

Legenda: FDN: Fibra em Detergente Neutro; FDA: Fibra em Detergente Ácido.

Nota-se a presença de reduzidos teores de carboidratos fermentescíveis em ambas as biomassas (Meso + Casca Ext e Amêndoa Ext). Além disso, há uma quantidade significativa de lignina e óleo residual (Extrato Etéreo), o que, em tese, prejudicaria a hidrólise enzimática dos carboidratos.

## 5.2 Resumo do quadro de análise de variância

A seguir, a Tabela 7 apresenta o resumo dos resultados estatísticos das variáveis: resíduo após o pré-tratamento, coeficiente de hidrólise da fibra, coeficiente de hidrólise do amido, concentração de glicose e estimativa da produção de etanol, com seus respectivos quadrado médio e significância.

**Tabela 7.** Resumo do quadro de análise de variância.

FV	GL	QM				
		R. A. P. T.	CH <sub>FIBRA</sub>	CH <sub>AMIDO</sub>	Glicose (g/L)	E. E. (ml/kgMS)
Biomassa	1	0,63*	0,28 <sup>ns</sup>	13,34*	2,12*	0,42*
Pré-tratamento	1	1,38*	85,18*	0,53*	0,04 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>
Bio.* Pré-trat.	1	3,08*	0,01 <sup>ns</sup>	1,90*	0,04 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>
Erro	16	0,05	0,88	0,75	0,09	0,02
T. corrigido	19					
CV %		2,59	30,85	42,26	28,75	12,6

Legenda: R. A. P. T.: Resíduo obtido após o pré-tratamento; CH<sub>FIBRA</sub>: Coeficiente de hidrólise da fibra; CH<sub>AMIDO</sub>: Coeficiente de hidrólise do amido; Glicose (g/L): Concentração de glicose, em grama por litro; E. E. (ml/KgMS): Estimativa de produção de etanol, em mililitro por quilo de matéria seca pré-tratada; \* – significativo ao nível de (p<0,05). ns – não significativo ao nível de (p>0,05).

## 5.3 Resíduo obtido após o pré-tratamento

Constatou-se, no desenvolvimento do trabalho, a ocorrência de interação significativa (P<0,05) entre biomassa e pré-tratamento. Nesse contexto, o pré-tratamento com peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 5%) resultou, significativamente, em menor quantidade de resíduo (64,39 % MS) para biomassa Amêndoa Ext, quando comparado ao pré-tratamento com água destilada (H<sub>2</sub>O). O pré-tratamento com H<sub>2</sub>O, no entanto, não diferiu de forma significativa do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, para a quantidade de resíduo (% MS) identificada após o pré-tratamento da biomassa Meso + Casca Ext.

Ao se analisar o desdobramento de biomassa dentro de cada nível de pré-tratamento, observou-se uma menor média de resíduo para Amêndoa Ext, diferindo estatisticamente do Meso + Casca Ext dentro do pré-tratamento com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (5%). Já dentro do pré-tratamento com água



destilada, a biomassa Meso + Casca Ext apresentou, significativamente, menor quantidade média de resíduo (Tabela 8).

**Tabela 8.** Resíduo obtido após o pré-tratamento das biomassas Amêndoa Ext e Meso + Casca Ext da Macaúba.

Biomassas	Pré-tratamento	
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
AE	64,39 <sup>Bb</sup>	87,11 <sup>Aa</sup>
MCE	71,56 <sup>Aa</sup>	67,19 <sup>Ba</sup>

Legenda: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Peróxido de hidrogênio alcalino; H<sub>2</sub>O: Água destilada; AE: Amêndoa Extrusada; MCE: Mesocarpo mais Casca Extrusados.

Médias seguidas de mesma letra “maiúscula” (na coluna) e “minúscula” (na linha) não diferem entre si (P>0,05) pelo teste Scott-Knott. CV (%): 2,59

A partir destes resultados, ficaram demonstrados os efeitos dos pré-tratamentos sobre os resíduos da Macaúba, havendo diferença significativa entre eles, de modo a influenciarem na remoção de compostos celulares de cada biomassa em estudo, o que implica dizer que o pré-tratamento com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> removeu mais material da Amêndoa Ext do que do Meso + Casca Ext, enquanto que o pré-tratamento H<sub>2</sub>O retirou mais material da biomassa Meso + Casca Ext do que da biomassa Amêndoa Ext, durante os tratamentos avaliados.

Em síntese, na hipótese de se considerar o tratamento H<sub>2</sub>O como ‘Branco’, isto é, isolando-se o efeito hidrolítico da água, observa-se uma participação significativa do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (5% v/v) de 22,72% na desestruturação da Amêndoa Ext e, estatisticamente, nenhum efeito sobre o Meso + Casca Ext.

Júnior (2018), em seus estudos, também observou a ocorrência de interação significativa (P<0,05) entre as biomassas (capim-elefante - CE, capim-mulato - HD364, casca de arroz – CA, folhas da planta de abacaxi – ABX e rama da batata-doce cultivar DUDA - BD) dentro de cada um dos diferentes pré-tratamentos, para a quantidade de material recuperado. O pré-tratamento que proporcionou menor rendimento de material insolúvel recuperado foi o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (3%, pH 11,5).

De Paula (2021) estimou a produção de etanol a partir de biomassas lignocelulósicas pré-tratadas com peróxido de hidrogênio alcalino (PHA). Neste trabalho, não foi observada interação significativa para o rendimento no pré-tratamento (P>0,05) entre as biomassas (CE, HD364, CA, ABX) e as concentrações de peróxido (1% e 2% v/v). Segundo a autora, para todas as biomassas estudadas, a concentração 2% de peróxido resultou em uma fração residual menor de material tratado quando comparado com 1%. Ho, Ong e Wu (2019) destacaram o potencial de se utilizar o

PHA, particularmente para fins de processamento de biomassa lignocelulósica para produção de biocombustíveis.

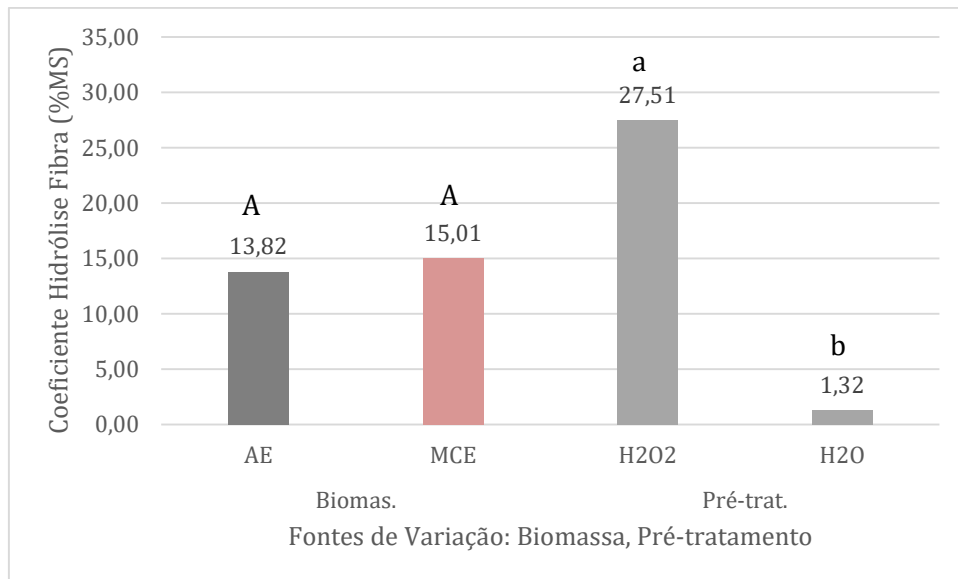
Várias biomassas lignocelulósicas foram pré-tratadas, utilizando-se o PHA no processo, com a finalidade de remover a lignina da parede celular. Entre elas: o capim elefante BRS Capiaçú (GODINHO et al., 2019), vagem de cacau (DAHUNSI; ADESULU-DAHUNSI; IZEBERE, 2019), coníferas (Abeto de Douglas) (ALVAREZ-VASCO e ZHANG, 2017), bagaço de cana-de-açúcar (VERARDI et al., 2018), bagaço de Agave-azul (GALINDO-HERNÁNDEZ et al., 2018). Ho, Ong e Wu (2019) relataram que o peróxido de hidrogênio alcalino tem a capacidade de remover seletivamente a lignina, ao mesmo tempo em que enriquece o teor de celulose.

### 5.3 Coeficientes de hidrólise da fibra e do amido

Uma vez verificada a interação entre as biomassas e os pré-tratamentos, para a variável Resíduo após o pré-tratamento (% MS), pode-se apresentar o efeito desses fatores sobre os coeficientes de hidrólise enzimática celulolítica e amilolítica das biomassas.

Faz-se necessário reiterar que após isolar o efeito da solubilização da água do efeito hidrolítico enzimático nos resíduos da Macaúba, obteve-se o coeficiente de hidrólise da fibra ( $CH_{\text{Fibra}}$ ). Esse procedimento, chamado de ‘Branco’ (sem enzima), também foi realizado para a hidrólise enzimática do amido ( $CH_{\text{Amido}}$ ).

Para o coeficiente de hidrólise da fibra, não houve interação significativa entre as fontes de variação, o que significa dizer que as biomassas demonstraram um comportamento semelhante para a variável  $CH_{\text{Fibra}}$ , dentro de cada nível de pré-tratamento. Houve apenas diferença significativa entre os pré-tratamentos, sendo que o peróxido de hidrogênio alcalino resultou em um maior coeficiente e, portanto, em maior despolimerização da parede celular (celulose, hemicelulose, lignina). Assim, o pré-tratamento com  $H_2O_2$  (5% v/v) foi efetivo em facilitar o acesso das enzimas celulolíticas ao substrato de interesse. Ainda assim, se faz importante mencionar, conforme os dados da Tabela 6, que os resíduos da Macaúba apresentam baixos teores de celulose, podendo significar, neste caso, em pequenas quantidades de açúcares fermentescíveis, no mosto hidrolisado (Figura 4).



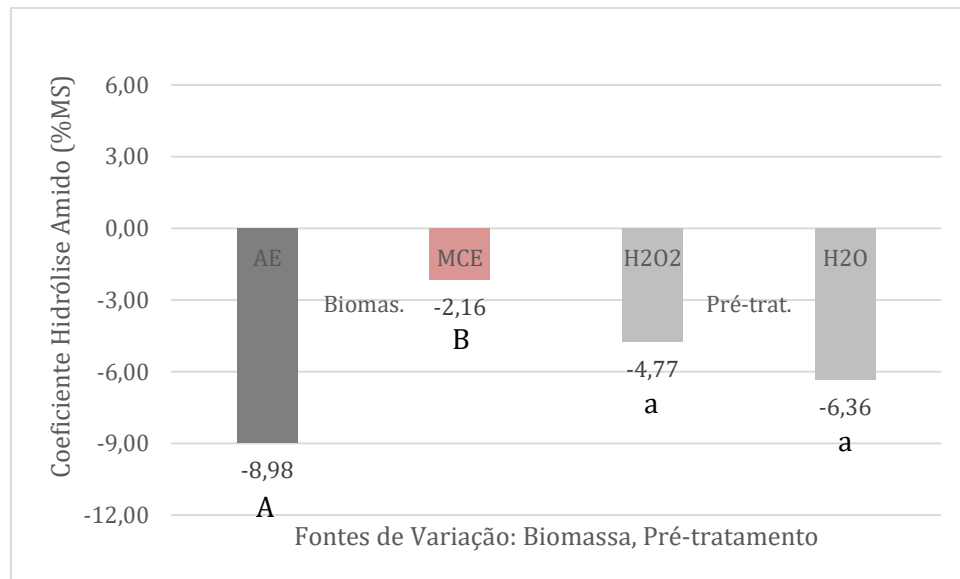
**Figura 4.** Coeficiente de Hidrólise da Fibra (%MS) identificado na hidrólise das biomassas Amêndoa Ext e Meso + Casca Ext da Macaúba, com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

Legenda: Biomass: Biomassa; Pré-trat: Pré-tratamento; AE: Amêndoa Extrusada; MCE: Mesocarpo mais Casca Extrusados; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Peróxido de hidrogênio alcalino; H<sub>2</sub>O: água destilada.

Médias seguidas de mesma letra “maiúscula” (comparam biomassas) e “minúscula” (comparam pré-tratamentos) não diferem entre si (P>0,05) pelo teste Scott-Knott. CV (%): 28,09

De todo modo, as biomassas extrusadas, pré-tratadas com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (5% v/v), apresentaram menor resistência à ação das enzimas no processo de hidrólise enzimática. Além disso, a diferença entre os pré-tratamentos sobre o coeficiente de hidrólise da fibra foi de 20,84 vezes maior para o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Isso pode significar que o pré-tratamento separou o óleo residual (Extrato Etéreo, Tabela 6) e facilitou a ação das enzimas celulolíticas.

Com relação à hidrólise do amido, observou-se efeito negativo sobre os coeficientes de hidrólise enzimática, em todos os tratamentos. Verificou-se, neste caso, um maior valor negativo do coeficiente na Amêndoa Ext pré-tratada com água destilada (H<sub>2</sub>O). Constatou-se a ocorrência de precipitação de material em suspensão, com a adição das enzimas amilolíticas. Isso porque notou-se a presença de partículas de tamanho superior ao tamanho das partículas das biomassas e de coloração esbranquiçada, após hidrólise e secagem das amostras. Tais partículas decorrem de um dos solutos da solução tampão (Figura 5).



**Figura 5.** Coeficiente de Hidrólise do Amido (% MS) identificado na hidrólise das biomassas Amêndoa Ext e Meso + Casca Ext da Macaúba, com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.

Legenda: Biomass: Biomassa; Pré-trat: Pré-tratamento; AE: Amêndoa Extrusada; MCE: Mesocarpo mais Casca Extrusados; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Peróxido de hidrogênio alcalino; H<sub>2</sub>O: água destilada.

Médias seguidas de mesma letra “maiúscula” (comparam biomassas) e “minúscula” (comparam pré-tratamentos) não diferem entre si ( $P > 0,05$ ) pelo teste Scott-Knott. CV (%): 42,26

Os dados extraídos da hidrólise enzimática do amido foram submetidos à análise de variância. Isto posto, apenas as biomassas diferiram significativamente entre si, sendo a Amêndoa Ext a que sofreu maior agregação de partículas (maior peso do resíduo após hidrólise). Em adição, uma observação que deve ser feita diz respeito à alta variabilidade (CV (%): 42,26) dos dados, o que pode representar uma variabilidade expressiva, quanto ao teor de amido hidrolisável presente nas biomassas amêndoa, mesocarpo e casca, em populações de Macaúba.

A ocorrência de precipitação de material interferiu no processo de hidrólise do amido. Este fato somado aos reduzidos teores de amido hidrolisável encontrados nas amostras, mais o efeito das enzimas, podem ter contribuído para os índices negativos dos coeficientes de hidrólise enzimática amilolítica. Além do mais, as biomassas contêm uma fração importante de óleo residual (vide Tabela 6) que pode ter influenciado no processo, no sentido de prejudicar o acesso das enzimas amilolíticas.

A eficiência de hidrólise enzimática depende muito do nível de interrupção da recalcitrância alcançado pelo pré-tratamento aplicado (TANG et al., 2019). Na etapa de pré-tratamento, é desejável remover o máximo de lignina para aumentar a hidrólise da celulose (KUMAR et al., 2019). Neste contexto, Yang et al. (2021) estudaram as características correlacionadas à melhoria

da hidrólise enzimática de palha de milho submetida a pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino. Conforme os outros, a remoção da lignina e a destruição das ligações de hidrogênio dentro da celulose e da hemicelulose aumentaram a acessibilidade da celulose e reduziram a adsorção não produtiva da celulase, o que corrobora a importância do pré-tratamento com PHA sobre as biomassas lignocelulósicas.

Nesse cenário, Zhang, Han e Dong (2021) consideraram a quantidade de sítios de ligação da celulose expostos à enzima como essencial fator de influência na adsorção da enzima. Os autores acrescentam ainda que, embora a eficiência de conversão da hidrólise enzimática seja melhorada após o pré-tratamento, a baixa taxa de conversão de celulose em glicose e o alto custo das enzimas são os principais desafios enfrentados pelos cientistas.

## 5.4 Estimativa da produção de etanol celulósico

### 5.4.1 Concentração de glicose

A tabela 9 mostra a concentração de glicose livre, obtida por meio de Cromatografia, de cada nível das fontes de variação. Nesta análise, verificou-se a ocorrência de baixos teores de glicose, podendo significar, dessa forma, uma alteração não significativa do teor de celulose disponível, com a aplicação do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como pré-tratamento, apesar do alto rendimento desse processo na desconstrução da fibra.

Houve diferença significativa apenas entre as biomassas, de modo a não haver glicose livre no mosto hidrolisado da Amêndoa Ext e haver uma concentração média de glicose de 1,50 (g/L) no hidrolisado do Meso + Casca Ext. Agora, com relação aos pré-tratamentos, não houve diferença significativa entre eles. Assim sendo, os pré-tratamentos não influenciaram na concentração de glicose, restando apenas o papel do complexo enzimático Cellic CTec2, na geração de glicoses livres da biomassa Meso + Casca Ext (Tabela 9).

**Tabela 9.** Concentração média de glicose (g/L) na Amêndoa Ext e no Meso + Casca Ext da Macaúba.

<b>F.V</b>	<b>Níveis</b>	<b>Glicose g/L</b>
Biomassa	AE	0,00 <sup>b</sup>
	MCE	1,50 <sup>a</sup>
Pré-trat.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,88 <sup>A</sup>

	H <sub>2</sub> O	0,62 <sup>A</sup>
<b>CV (%)</b>	28,75	

Legenda: F.V: Fonte de Variação; Pré-trat: Pré-tratamento; g/L: grama por Litro; AE: Amêndoa Extrusada; MCE: Mesocarpo mais Casca Extrusados; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Peróxido de hidrogênio alcalino; H<sub>2</sub>O: água destilada.

Médias seguidas de mesmas letras “maiúscula” (comparam pré-tratamentos) e “minúscula” (comparam biomassas) não diferem entre si (P>0,05) pelo teste Scott-Knott.

Em análise dos açúcares, realizada em CLAE, observou-se, também, a presença de celobiose em todos os tratamentos. Este fato pode indicar uma menor eficiência do complexo enzimático, especificamente sobre as biomassas Meso + Casca Ext e Amêndoa Ext da macaúba. Nesse sentido, a maior concentração de β-glicosidase no complexo Cellic Cetec2 não resultou em uma conversão completa do substrato. Uma explicação possível decorre da presença de fatores limitantes, como o óleo residual. Adicionalmente, cabe reiterar que as biomassas em questão apresentam baixos teores de carboidratos fermentescíveis.

Em outra análise, devido ao baixo teor de amido encontrado nas biomassas extrusadas e ao efeito negativo na hidrólise enzimática do amido, considerou-se razoável não submeter o respectivo mosto hidrolisado à Cromatografia para quantificar os açúcares fermentescíveis e estimar o potencial de etanol amiláceo.

#### 5.4.2 Etanol celulósico

A estimativa da produção de etanol celulósico se deu por estequiometria de Gay-Lussac, onde a cada 100 Kg de ART se produz 46,49 Kg de etanol. Nesta perspectiva, as análises para estimar a produção de etanol dos resíduos da macaúba demonstraram valores que induzem a uma assertiva de que os resíduos não são adequados para produção de etanol, pois o Meso + Casca Ext apresentou um reduzido teor de ART e, conseqüentemente, baixa produção de etanol (0,70 ml/Kg MS<sub>pré-tratada</sub>), enquanto que a Amêndoa Ext apresentou zero teor de glicose (vide Tabela 7). Provavelmente, a ação de fatores de inibição nesta biomassa foi maior.

A estimativa de produção de etanol celulósico em L.t<sup>-1</sup> de MS correspondeu a 0,70 L.t<sup>-1</sup> de MS. Como já relatado anteriormente, a quantidade de glicose disponível é baixa, o que implica necessariamente em uma estimativa de produção de etanol de valor irrisório, do ponto de vista econômico e operacional. Contudo, o pré-tratamento com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (5%) apresentou alto rendimento na desestruturação da parede celular e proporcionou uma quantidade significativa de fração

solúvel. Assim, o peróxido alcalino ( $H_2O_2$ ) pode ser usado no pré-tratamento das biomassas em estudo, tendo em vista outras finalidades.

Conforme Favaro e Miranda (2013), os resíduos da polpa (mesocarpo) da Macaúba poderiam ser usados para produção de etanol de segunda geração. Entretanto, os resíduos extrusados da macaúba – mesocarpo, casca e amêndoa –, avaliados neste estudo, apresentaram-se inadequados para essa aplicação. Diferentes matérias-primas lignocelulósicas têm sido usadas para a produção de etanol, mas a variedade e a variabilidade entre as biomassas tornam o processo de bioconversão complicado (DEVI et al., 2021). É sabido que a Macaúba (*A. aculeata*) apresenta diversidade genética (SILVA et al., 2017). Por isso, estratégias de conservação e melhoramento da macaúba devem ser feitas para proteger sua variabilidade genética (SIMIQUELI et al., 2018).

O pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino (PHA) não influenciou na estimativa da produção de etanol celulósico das biomassas de macaúba. Para outras biomassas, alguns autores relatam vantagens em seu uso, como custos mais baixos do que outros produtos químicos de pré-tratamento (VERARDI et al., 2018). Porém, uma desvantagem importante do pré-tratamento PHA é a necessidade em manter um alto valor de pH da mistura de reação. Ademais, a fase líquida da amostra pré-tratada deve ser separada dos sólidos residuais antes de qualquer conversão biológica. A biomassa deve ser lavada intensamente para remover todos os potenciais tóxicos da estrutura. Esta ação tem alguns pontos fracos, como a possibilidade de perda dos compostos desejados com a fase líquida (MICHALSKA; LEDAKOWICZ, 2016).

Biomassas lignocelulósicas, como o Sorgo biomassa, Capim Elefante e Cânhamo industrial, foram pré-tratadas com peróxido de hidrogênio alcalino para obtenção de etanol 2G. Os resultados de rendimento em etanol foram de 56,37 (SOUSA, 2020), 113,37 (JÚNIOR, 2018) e 221,80 (KUGLARZ et al., 2016) L/t MS (Tabela 5), respectivamente. Isso mostra que, dependendo das características da biomassa, o PHA pode promover um maior rendimento em etanol lignocelulósico.

A produção de etanol 2G a partir de biomassa lignocelulósica melhorou muito após diversas atividades notáveis de pesquisa e desenvolvimento (PATEL; SHAH, 2021), e tem recebido um interesse crescente devido ao custo relativamente baixo, alta abundância e capacidade de renovação da matéria-prima (WANG et al., 2020). Um fator preocupante na produção de etanol de segunda geração está relacionado ao custo das enzimas, considerado, segundo Paz-Cedeno et al. (2021), o

principal gargalo que impede sua viabilidade econômica. Por outro lado, acredita-se que este desafio será superado com os avanços tecnológicos e científicos.

## 6. Conclusão

Os efeitos do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino ( $H_2O_2$ , 5% v/v) sobre as biomassas Mesocarpo mais Casca extrusados e Amêndoa extrusada da Macaúba influenciaram no aumento do coeficiente de hidrólise enzimática da fibra. Já na hidrólise do amido, não houve diferença significativa entre os pré-tratamentos. Nesta hidrólise, ocorreu precipitação de material, verificando-se, deste modo, efeito negativo em seu coeficiente; ou seja, os diminutos teores de amido tornaram-se indisponíveis.

O aumento do coeficiente de hidrólise da fibra não resultou em disponibilidade significativa de glicoses livres no mosto, haja vista os reduzidos teores de celulose hidrolisável encontrados em ambas as biomassas. Portanto, submetê-las ao processo de obtenção de etanol pode não ser o melhor caminho.

## Referências bibliográficas

- ABDULLAH, M. A.; NAZIR, M. S.; RAZA, M. R.; WAHJOEDI, B. A.; YUSSOF, A. W. Autoclave and ultra-sonication treatments of oil palm empty fruit bunch fibers for cellulose extraction and its polypropylene composite properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 686-697, 2016.
- ABRAHAM, A.; MATHEW, A. K.; PARK, H.; CHOI, O.; SINDHU, R.; PARAMESWARAN, B.; PANDEY, A.; PARK, J. H.; SANG, B.-I. Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 301, p. 122725, 2020. doi:10.1016/j.biortech.2019.122725.
- AFSAL, A.; DAVID, R.; BAIJU, V.; SUHAIL, N. M.; PARVATHY, U.; RAKHI, R. B. (2020). Experimental investigations on combustion characteristics of fuel briquettes made from vegetable market waste and saw dust. **Materials Today: Proceedings**. doi:10.1016/j.matpr.2020.06.222.
- AKBAY, H. E. G.; DIZGE, N.; KUMBUR, H. Enhancing biogas production of anaerobic co-digestion of industrial waste and municipal sewage sludge with mechanical, chemical, thermal, and hybrid pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 340, p. 125688, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125688>.
- ALKAN, Ö.; ALBAYRAK, Ö. K. (2020). Ranking of renewable energy sources for regions in Turkey by fuzzy entropy based fuzzy COPRAS and fuzzy MULTIMOORA. **Renewable Energy**. doi:10.1016/j.renene.2020.08.062.
- ALLE, M.; BANDI, R.; LEE, S.-H.; KIM, J.-C. (2020). **Recent trends in isolation of cellulose nanocrystals and nanofibrils from various forest wood and non-wood products and their**



**application.** *Nanomaterials for Agriculture and Forestry Applications*, p. 41–80. doi:10.1016/b978-0-12-817852-2.00003-2.

ÁLVAREZ, C.; SÁEZ, F.; GONZÁLEZ, A.; BALLESTEROS, I.; OLIVA, J. M.; NEGRO, M. J. Production of xylooligosaccharides and cellulosic ethanol from steam-exploded barley straw. *Holzforschung*, v. 73, p. 35-44, 2018. doi:10.1515/hf-2018-0101.

ALVAREZ-VASCO, C.; ZHANG, X. Alkaline hydrogen peroxide (AHP) pretreatment of softwood: Enhanced enzymatic hydrolysability at low peroxide loadings. *Biomass and Bioenergy*, v. 96, p. 96–102, 2017. doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.11.005.

ARAÚJO, M. R. G.; MELO JÚNIOR, A. F. DE.; MENEZES, E. V.; BRANDÃO, M. M.; COTA, L. G.; OLIVEIRA, D. A. DE.; ROYO, V. A.; VIEIRA, F. A. Fine-scale spatial genetic structure and gene flow in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae): Analysis in an overlapping generation. *Biochemical Systematics and Ecology*, v. 71, p. 147–154, 2017. doi:10.1016/j.bse.2017.02.005.

ARUN, N.; DALAI, A. K. (2020). **Environmental and socioeconomic impact assessment of biofuels from lignocellulosic biomass.** *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels*, p. 283–299. doi:10.1016/b978-0-12-815936-1.00009-5.

ASSUMPCÃO, S. M. N.; PONTES, L. A. M.; CARVALHO, L. S.; CAMPOS, L. M. A.; ANDRADE, J. C. F.; SILVA, E. G. Pré-Tratamento Combinado H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NaOH para Obtenção das Frações Lignocelulósicas do Bagaço da Cana-de-Açúcar. *Rev. Virtual Quim*, v. 8, n. 3, p. 803-822, 2016.

BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, v. 52, p. 858-875, 2011.

BARUA, V. B.; KALAMDHAD, A.S. Effect of Various Types of Thermal Pretreatment Techniques on the Hydrolysis, Compositional Analysis and Characterization of Water Hyacinth. *Bioresource Technology* (2016). doi: http:// dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.036.

BATISTA, I. N. **Estimativa da produção potencial de etanol de diferentes espécies de Braquiárias.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Tocantins. Programa de pós-graduação em Agroenergia. Palmas, 2016.

BEMILLER, J. N. (2019). **Cellulose and Cellulose-Based Hydrocolloids.** *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*, p. 223–240. doi:10.1016/b978-0-12-812069-9.00008-x.

BENSAH, E. C.; KÁDÁR, Z.; MENSAH, M. Y. Alkali and glycerol pretreatment of West African biomass for production of sugars and ethanol. *Bioresource Technology Reports*, v. 6, p. 123–130, 2019. doi:10.1016/j.biteb.2019.02.013.

BEZERRA, F. D. **Energia Solar.** Caderno Setorial. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - ETENE. Ano 5, n. 110, 2020. Disponível em: [https://www.bnb.gov.br/documents/80223/6888946/110\\_Energia+Solar.pdf](https://www.bnb.gov.br/documents/80223/6888946/110_Energia+Solar.pdf). Acesso em: 26 nov. 2020.

BILGIC, E.; YAMAN, S.; HAYKIRI-ACMA, H.; KUCUKBAYRAK, S. Is torrefaction of polysaccharides-rich biomass equivalent to carbonization of lignin-rich biomass? **Bioresource Technology**, v. 200, p. 201–207, 2016. doi:10.1016/j.biortech.2015.10.032.

BLAZQUEZ, J.; FUENTES, R.; MANZANO, B. On some economic principles of the energy transition. **Energy Policy**, v. 147, p.111807, 2020. doi:10.1016/j.enpol.2020.111807.

BLÜMMEL, M.; ORSKOV, E. R. Comparison of “in vitro” gas production and nylon degradability of roughage in predicting feed intake in cattle. **Animal Feed Science and Technology**, v. 40, n. 12, p. 109-119, 1993.

BONATTO, C.; CAMARGO, A. F.; SCAPINI, T.; STEFANSKI, F. S.; ALVES, S. L.; MÜLLER, C.; FONGARO, G.; TREICHEL, H. (2020). **Biomass to bioenergy research: current and future trends for biofuels**. Recent Developments in Bioenergy Research, p. 1–17. doi:10.1016/b978-0-12-819597-0.00001-5.

BONSU, B. O.; TAKASE, M.; MANTEY, J. Preparation of charcoal briquette from palm kernel shells: case study in Ghana. **Heliyon**, v. 6, p. 05266, 2020.

CAO, W.; SUN, C.; LIU, R.; YIN, R.; WU, X. Comparison of the effects of five pretreatment methods on enhancing the enzymatic digestibility and ethanol production from sweet sorghum bagasse. **Bioresource Technology**, v. 111, p. 215–221, 2012. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.034

CARDOSO, A.; LAVIOLA, B. G.; SANTOS, G. S.; DE SOUSA, H. U.; DE OLIVEIRA, H. B.; VERAS, L. C.; CIANNELLA, R.; FAVARO, S. P. Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry systems. **Industrial Crops and Products**, v. 107, p. 573–580, 2017. doi:10.1016/j.indcrop.2017.04.023.

CARPIO, L. G. T.; SIMONE DE SOUZA, F. Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second generation ethanol in Brazil: Scenarios of cost reductions. **Renewable Energy**, v. 111, p. 771–780, 2017. doi:10.1016/j.renene.2017.05.015.

CASTOLDI, R.; BRACHT, A.; DE MORAIS, G. R.; BAESSO, M. L.; CORREA, R. C. G.; PERALTA, R. A.; PERALTA, R. M. Biological pretreatment of *Eucalyptus grandis* sawdust with white-rot fungi: study of degradation patterns and saccharification kinetics. **Chemical Engineering Journal**, v. 258, p. 240-246, 2014.

CERVI, W. R.; LAMPARELLI, R. A. C.; SEABRA, J. E. A.; JUNGINGER, M.; VAN DER HILST, F. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 391–399, 2019. doi:10.1016/j.biombioe.2019.02.001.

CÉSAR, A. D. S.; ALMEIDA, F. D. A.; DE SOUZA, R. P.; SILVA, G. C.; ATABANI, A. E. The prospects of using *Acrocomia aculeata* (macaúba) a non-edible biodiesel feedstock in Brazil. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 49, p. 1213–20, 2015. doi.org/10.1016/j.rser.2015. 04.125.

CHEN, C.; JIN, D.; OUYANG, X.; ZHAO, L.; QIU, X.; WANG, F. Effect of structural characteristics on the depolymerization of lignin into phenolic monomers. **Fuel**, v. 223, p. 366–372, 2018.

- CHENG, F.; BAYAT, H.; JENA, U.; BREWER, C. E. (2020). Impact of Feedstock Composition on Pyrolysis of Low-Cost, Protein- and Lignin-Rich Biomass: A Review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 104780. doi:10.1016/j.jaap.2020.104780.
- CIRIA, P.; BARRO, R. (2016). **Biomass resource assessment**. Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining, p. 53–83. doi:10.1016/b978-1-78242-366-9.00003-4.
- CURTI, C. **Pré-tratamento de biomassa microalgácea utilizando enzimas hidrolíticas provenientes de isolados fúngicos**. 2019. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal do Espírito Santo-UFES, Vitória - ES, 2019.
- DAHUNSI, S. O.; ADESULU-DAHUNSI, A. T.; IZEBERE, J. O. Cleaner energy through liquefaction of Cocoa (*Theobroma cacao*) pod husk: Pretreatment and process optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 578-588, 2019.
- DANILOW, R. Z.; PATUSCO, J. A. M.; BANDEIRA, D. O.; RIBEIRO, G. K.; SANTOS, M. C. M.; FARIA, A. C. P. **Resenha Energética Brasileira**, ano base 2019. Ministério de Minas e Energia. Ed. 30 mai. 2020. 32p. Disponível em: [www.mme.gov.br/documents/36208/948169](http://www.mme.gov.br/documents/36208/948169). Acesso em: 01 dez. 2020.
- DE PAULA, L. Estimativa da produção de etanol a partir de biomassas lignocelulósicas pré-tratadas com peróxido de hidrogênio. **Revista Agrária Acadêmica**, v. 4, n. 3, p. 72-83, 2021. doi: 10.32406/v4n3/2021/72-83/agrariacad.
- DE PAULA PROTÁSIO, T.; ROQUE LIMA, M. D.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; RODRIGUES DE FIGUEIREDO, I. C.; GHERARDI HEIN, P. R.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of Eucalyptus clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34-45, 2021. doi:10.1016/j.renene.2020.09.057.
- DE SOUZA, Z. J. (2020). **Bioelectricity of sugarcane: a case study from Brazil and perspectives**. Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives, p. 255–279. doi:10.1016/b978-0-12-814236-3.00013-5.
- DEVI, A.; SINGH, A.; BAJAR, S.; PANT, D.; DIN, Z. U. Ethanol from lignocellulosic biomass: An in-depth analysis of pre-treatment methods, fermentation approaches and detoxification processes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, p. 105798, 2021. doi.org/10.1016/j.jece.2021.105798.
- DJURISIC, V.; SMOLOVIC, J. C.; MISNIC, N.; ROGIC, S. Analysis of public attitudes and perceptions towards renewable energy sources in Montenegro. **Energy Reports**, v. 6, p. 395–403, 2020. doi.org/10.1016/j.egyr.2020.08.059.
- DUARTE, S.; LV, P.; ALMEIDA, G.; ROLÓN, J. C.; PERRÉ, P. Alteration of physico-chemical characteristics of coconut endocarp — *Acrocomia aculeata* — by isothermal pyrolysis in the range 250–550 °C. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 126, p. 88–98, 2017. doi:10.1016/j.jaap.2017.06.021.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em: 20 nov. 2020.

- ERABI, M.; GOSHADROU, A. Bioconversion of *Glycyrrhiza glabra* residue to ethanol by sodium carbonate pretreatment and separate hydrolysis and fermentation using *Mucor hiemalis*. **Industrial Crops and Products**, v. 152, p. 112537, 2020. doi:10.1016/j.indcrop.2020.112537.
- EVARISTO, A. B.<sup>b</sup>; GROSSI, J. A. S.; CARNEIRO, A DE C. O.; PIMENTEL, L. D.; MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass Bioenergy**, v. 85, p. 18–24, 2016. doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.024.
- EVARISTO, A. B.<sup>a</sup>; MARTINO, D. C.; FERRAREZ, A. H.; DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; GROSSI, J. A. S. Potencial energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 571-577, 2016.
- FAVARO, S. P.; MIRANDA, C. H. B. Aproveitamento de espécies nativas e seus coprodutos no contexto de biorrefinaria. **Documentos** 14, Embrapa Agroenergia, 38 p. 2013.
- FERNÁNDEZ-COPPEL, I. A.; BARBOSA-EVARISTO, A.; CORRÊA-GUIMARÃES, A.; MARTÍN-GIL, J.; NAVAS-GRACIA, L. M.; MARTÍN-RAMOS, P. Life cycle analysis of macauba palm cultivation: A promising crop for biofuel production. **Industrial Crops and Products**, v. 125, p. 556–566, 2018. doi:10.1016/j.indcrop.2018.09.036.
- FERREIRA, D. F. **Sisvar**. Versão 5.6. Lavras: UFLA/DEX, 2015. Disponível em: < <http://www.dex.ufla.br> >. Acesso em: 26 Dez. 2020.
- FINGUERUT, J.; LEIMER, K. H.; LUCREDI, H. A.; ROSSELL, C. E. V. **Estequiometria da fermentação alcoólica a partir do caldo de cana**. Piracicaba: Copersucar, n. 12, p. 45-48, 1985 (Boletim Técnico Copersucar 35/85).
- GALINDO-HERNÁNDEZ, K. L.; TAPIA-RODRÍGUEZ, A.; ALATRISTE-MONDRAGÓN, F.; CELIS, L. B.; ARREOLA-VARGAS, J.; RAZO-FLORES, E. (2018). Enhancing saccharification of *Agave tequilana* bagasse by oxidative delignification and enzymatic synergism for the production of hydrogen and methane. **International Journal of Hydrogen Energy**. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.10.071.
- GANGULY, P.; SENGUPTA, S.; DAS, P.; BHOWAL, A. Valorization of food waste: Extraction of cellulose, lignin and their application in energy use and water treatment. **Fuel**, v. 280, p. 118581, 2020. doi:10.1016/j.fuel.2020.118581.
- GAO, Y.; XU, J.; ZHANG, Y.; YU, Q.; YUAN, Z.; LIU, Y. Effects of different pretreatment methods on chemical composition of sugarcane bagasse and enzymatic hydrolysis. **Bioresource Technology**, v. 144, p. 396-400, 2013.
- GLÓRIA, P. R. A.; SIQUEIRA, F. L. T.; SIQUEIRA, G. B.; SANTOS, W. B. R.; BATISTA, I. N. Influência da adubação nitrogenada, idades de corte da planta e pré-tratamentos da fibra sobre a produção de etanol de Capim-elefante cultivado em solos de cerrado. **Energia na Agricultura**, v. 35, n. 1, p. 62-79, 2020. doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n1p62-79.
- GODINHO, E. Z.; PERIN, A. A.; BAUMGARTNER, T. R. S.; HASAN, S. D. M. Alkaline and alkaline-oxidative hydrothermal pretreatment on cellulose and lignin contents in elephant grass biomass BRS Capiaçú. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 6 n. 3, p. 51-65, 2019.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p.7-20, 2007.

GUNNARSDOTTIR, I.; DAVIDSDOTTIR, B.; WORRELL, E.; SIGURGEIRSDOTTIR, S. Sustainable energy development: History of the concept and emerging themes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, p. 110770, 2021. doi.org/10.1016/j.rser.2021.110770.

HALDAR, D.; PURKAIT, M. K. A review on the environment-friendly emerging techniques for pretreatment of lignocellulosic biomass: Mechanistic insight and advancements. **Chemosphere**, v. 264, p. 128523, 2021. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128523.

HALDAR, D.; PURKAIT, M. K. Micro and nanocrystalline cellulose derivatives of lignocellulosic biomass: A review on synthesis, applications and advancements. **Carbohydrate Polymers**, v. 250, p. 116937, 2020. doi:10.1016/j.carbpol.2020.116937.

HAMAWAND, I.; SENEWEERA, S.; KUMARASINGHE, P.; BUNDSCHUH, J. Nanoparticle technology for separation of cellulose, hemicellulose and lignin nanoparticles from lignocellulose biomass: A short review. **Nano-Structures & Nano-Objects**, v. 24, p. 100601, 2020. doi:10.1016/j.nanoso.2020.100601.

HAMRAOUI, K.; GIL, A.; EL BARI, H.; SILES, J. A.; CHICA, A. F.; MARTÍN, M. A. Evaluation of hydrothermal pretreatment for biological treatment of lignocellulosic feedstock (pepper plant and eggplant). **Waste Management**, v. 102, p. 76–84, 2020. doi:10.1016/j.wasman.2019.10.020.

HO, M. C.; ONG, V. Z.; WU, T. Y. Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, p. 75–86, 2019. doi:10.1016/j.rser.2019.04.082.

HU, W.; FENG, Z.; YANG, J.; GAO, Q.; NI, L.; HOU, Y.; HE, Y.; LIU, Z. Combustion behaviors of molded bamboo charcoal: Influence of pyrolysis temperatures. **Energy**, v. 226, p. 120253, 2021. doi.org/10.1016/j.energy.2021.120253.

JÚNIOR, A. S. L. **Análise dos efeitos do peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) no pré-tratamento de diferentes biomassas para a produção de etanol**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Tocantins. Programa de pós-graduação em Agroenergia. Palmas, 2018.

KHAIRE, K.C.; MOHOLKAR, V.S.; GOYAL, A. Bioconversion of sugarcane tops to bioethanol and other value added products: An overview. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 4, p. 54–68, 2021. doi.org/10.1016/j.mset.2020.12.004.

KLUSKA, J.; OCHNIO, M.; KARDAŚ, D. Carbonization of corncobs for the preparation of barbecue charcoal and combustion characteristics of corncob char. **Waste Management**, v. 105, p. 560–565, 2020. doi:10.1016/j.wasman.2020.02.036.

KRISHNA S. H.; RAO, K. C. S.; BABU, J. S.; REDDY, D. S. Studies on the production and application of cellulose from *Trichoderma reesei* QM-9414. **Bioprocess Engineering**, v. 22, p. 467-470, 2000.

KUGLARZ, M.; ALVARADO-MORALES, M.; KARAKASHEV, D.; ANGELIDAKI, I. Integrated production of cellulosic bioethanol and succinic acid from industrial hemp in a biorefinery concept. **Bioresource Technology**, v. 200, p. 639-647, 2016. doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.081.

KUMAR, A. K.; SHARMA, S. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 4, n. 7, p. 1-19, 2017. https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9.

KUMAR, B.; BHARDWAJ, N.; AGRAWAL, K.; CHATURVEDI, V.; VERMA, P. Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept. **Fuel Processing Technology**, v. 199, p. 106244, 2020.

KUMAR, V.; YADAV, S. K.; KUMAR, J.; AHLUWALIA, V. (2019). A critical review on current strategies and trends employed for removal of inhibitors and toxic materials generated during biomass pretreatment. **Bioresource Technology**, 122633. doi:10.1016/j.biortech.2019.122633.

KÜÜT, A.; RITSLAID, K.; KÜÜT, K.; ILVES, R.; OLT, J. (2019). **State of the Art on the Conventional Processes for Ethanol Production**. Ethanol, p. 61–101. doi:10.1016/b978-0-12-811458-2.00003-1.

LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R. DE.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. DE C. O.; BUFALINO, L.; GHERARDI HEIN, P. R.; PROTÁSIO, T. de P. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105804, 2020. doi:10.1016/j.biombioe.2020.105804.

MA, S.; WANG, H.; LI, J.; FU, Y.; ZHU, W. Methane production performances of different compositions in lignocellulosic biomass through anaerobic digestion. **Energy**, v. 189, p. 116190, 2019. doi:10.1016/j.energy.2019.116190.

MACHADO, W.; FIGUEIREDO, A.; GUIMARÃES, M. F. Initial development of seedlings of macauba palm (*Acrocomia aculeata*). **Industrial Crops and Products**, v. 87, p. 14–19, 2016. doi:10.1016/j.indcrop.2016.04.022.

MAGALHÃES, K. T.; TAVARES, T. S.; NUNES, C. A. The chemical, thermal and textural characterization of fractions from Macauba kernel oil. **Food Research International**, v. 130, p. 108925, 2020. doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108925.

MAIRESSE, M. H. **Potencial de biomassa de *Ipomea batatas* (L.) Lam. na produção de etanol lignocelulósico**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Tocantins. Programa de pós-graduação em Agroenergia. Palmas, 2015.

MAMVURA, T. A.; DANHA, G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. **Heliyon**, v. 6, n. 3, e03531, 2020.

MANKAR, A. R.; PANDEY, A.; MODAK, A.; PANT, K. K. Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. **Bioresource Technology**, v. 334, p. 125235, 2021. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235.

- MENARDO, S.; AIROLDI, G.; BALSARI, P. The effect of particle size and thermal pretreatment on the methane yield of four agricultural by-products. **Bioresource Technology**, v. 104, p. 708-714, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.061>.
- MENG, X.; BHAGIA, S.; WANG, Y.; ZHOU, Y.; PU, Y.; DUNLAP, J. R.; SHUAI, L.; RAGAUSKAS, A. J.; YOO, C. G. Effects of the advanced organosolv pretreatment strategies on structural properties of woody biomass. **Industrial Crops & Products**, v. 146, p. 112144, 2020.
- MICHALSKA, K.; LEDAKOWICZ, S. (2016). **Alkaline Peroxide Pretreatment for an Effective Biomass Degradation**. Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery, p. 483–498. doi:10.1016/b978-0-12-802323-5.00021-9.
- MIRANDA, M. R. DA S.; VERAS, C. A. G.; GHESTI, G. F. Charcoal production from waste pequi seeds for heat and power generation. **Waste Management**, v. 103, p. 177–186, 2020. doi:10.1016/j.wasman.2019.12.025.
- MOHAMMED, N. A.; AL-BAZI, A. (2020). Management of renewable energy production and distribution planning using agent-based modelling. **Renewable Energy**. doi:10.1016/j.renene.2020.08.159.
- MONTENEGRO, R. H.; PAIVA, I.; FEITOSA, L. M. O lugar das fontes renováveis no relacionamento do Brasil com os “rics” na área de energia: uma análise da agenda bilateral e das declarações de cúpula (1990-2018). *Revista Conjuntura Austral*, v.11, n.53, p.139-160, 2020.
- MOREIRA, J. B. D.; REZENDE, D. B.; PASA, V. M. D. Deoxygenation of Macauba acid oil over Co-based catalyst supported on activated biochar from Macauba endocarp: A potential and sustainable route for green diesel and biokerosene production. **Fuel**, v. 269, 117253, 2020.
- MOTA, T. R.; OLIVEIRA, D. M.; MORAIS, G. R.; MARCHIOSI, R.; BUCKERIDGE, M. S.; FERRARESE-FILHO, O.; DOS SANTOS, W. D. Hydrogen peroxide-acetic acid pretreatment increases the saccharification and enzyme adsorption on lignocellulose. **Industrial Crops and Products**, v. 140, p. 111657, 2019. doi:10.1016/j.indcrop.2019.111657.
- NAKASU, P. Y. S.; IENCZAK, J. L.; RABELO, S. C.; COSTA, A. C. The water consumption of sugarcane bagasse post-washing after protic ionic liquid pretreatment and its impact on 2G ethanol production. **Industrial Crops & Products**, v. 169, p. 113642, 2021. doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113642.
- NASCIMENTO, W. G. **Composição Bromatológica e Coeficientes de Hidrólise enzimáticas de resíduos da Palmeira Macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2019.
- NGAMSIRISOMSAKUL, M.; REUNGSANG, A.; LIAO, Q.; KONGKEITKAJORN, M. B. (2019). Enhanced bio-ethanol production from *Chlorella sp.* biomass by hydrothermal pretreatment and enzymatic hydrolysis. **Renewable Energy**. doi:10.1016/j.renene.2019.04.008.
- NOGUEIRA, C. C.; PADILHA, C. E. A.; SANTOS, E. S. Enzymatic hydrolysis and simultaneous saccharification and fermentation of green coconut fiber under high concentrations of ethylene oxide-based polymers. **Renewable Energy** v. 163, p. 1536-1547, 2021. doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.050.

- NOVOZYMES, Ficha técnica: AMG 300L. 2002. Disponível em:<<https://www.emporiodolupulo.com.br/upload/download/index/upload/34/>>. Acesso em: 07 jun. 2021.
- NOVOZYMES, Novozymes Cellic® CTec2 and HTec2 - Enzymes for hydrolysis of lignocellulosic. 2015. Disponível em :<[www.bioenergy.novozymes.com](http://www.bioenergy.novozymes.com)>. Acesso em: 27 jun. 2020.
- PATEL, A.; SHAH, A. Integrated Lignocellulosic Biorefinery: Gateway for Production of Second Generation Ethanol and Value Added Products, **Journal of Bioresources and Bioproducts** (2021). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.02.001>.
- PAZ-CEDENO, F. R.; CARCELLER, J. M.; IBORRA, S.; DONATO, R. K.; GODOY, A. P.; VELOSO DE PAULA, A.; MONTI, R.; CORMA, A.; MASARIN, F. Magnetic graphene oxide as a platform for the immobilization of cellulases and xylanases: Ultrastructural characterization and assessment of lignocellulosic biomass hydrolysis. **Renewable Energy**, v. 164, p. 491–501, 2021. doi:10.1016/j.renene.2020.09.059.
- PAZUCH, F. A.; NOGUEIRA, C. E. C.; SOUZA, S. N. M.; MICUANSKI, V. C.; FRIEDRICH, L.; LENZ, A. M. (2017). Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 34–42, 2017. doi:10.1016/j.rser.2017.03.047.
- PEGORETTI DE SOUZA, H.; MUÑOZ, F.; MENDONÇA, R. T.; SÁEZ, K.; OLAVE, R.; SEGURA, C.; DE SOUZA, D. P. L.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. (2020). Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. **Renewable Energy**. doi:10.1016/j.renene.2020.10.065.
- PLATH, M.; MOSER, C.; BAILIS, R.; BRANDT, P.; HIRSCH, H.; KLEIN, A.-M.; WALMSLEY, D.; VON WEHRDEN, H. A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. **Biomass and Bioenergy**, v. 91, p. 186–195, 2016. doi:10.1016/j.biombioe.2016.04.009.
- PRADHAN, P.; MAHAJANI, S. M.; ARORA, A. Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. **Fuel**, v. 285, p. 119145, 2021. doi:10.1016/j.fuel.2020.119145.
- PRATES-VALÉRIO, P.; CELAYETA, J. M. F.; CREN, E. C. (2019). Quality parameters of mechanically extracted edible macauba oils (*Acrocomia aculeata*) for potential food and alternative industrial feedstock application. **European Journal of Lipid Science and Technology**, 121(5), 1800329.
- PROVORNAYA, I.V.; FILIMONOVA, I.V.; NEMOV, V. YU.; KOMAROVA, A. V.; DZYUBA, Y. A. Features of the petroleum products pricing in Russia, in the USA, and Saudi Arabia. **Energy Reports**, v. 6, p. 514–522, 2020.
- RAZMJOO, A.; GAKENIA KAIGUTHA, L.; VAZIRI RAD, M. A.; MARZBAND, M.; DAVARPANAH, A.; DENAI, M. A Technical analysis investigating energy sustainability



utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO<sub>2</sub> emissions in a high potential area. **Renewable Energy**, v. 164, p. 46-57, 2021. doi:10.1016/j.renene.2020.09.042.

RESENDE, R. T., KUKI, K. N., CORRÊA, T. R., ZAIDAN, Ú. R., MOTA, P. H. S., TELLES, L. A. A.; GONZALES, D. G. E.; MOTOIKE, S. Y.; RESENDE, M.D.V.; LEITE, H. G.; LORENZON, A. S. Data-based agroecological zoning of *Acrocomia aculeata*: GIS modeling and ecophysiological aspects into a Brazilian representative occurrence area. **Industrial Crops and Products**, v. 154, p.112749, 2020. doi:10.1016/j.indcrop.2020.112749.

REZANIA, S.; ORYANI, B.; CHO, J.; TALAIEKHOZANI, A.; SABBAGH, F.; HASHEMI, B.; RUPANI, P. F.; MOHAMMADI, A. A. Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: An overview. **Energy**, v. 199, p. 117457, 2020.

SANTOS, F. A. **Avaliação do pré-tratamento hidrotérmico de palhas de cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração**. 2013. 94 f. Tese (Doutorado em Ciências) - UFV, Viçosa - MG, 2013.

SANTOS, F. A.; QUEIROZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; MANFREDI, M.; QUEIROZ, M. E. L. R.; CALDAS, C. S.; SOARES, F. E. F. Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de etanol celulósico. **Quim. Nova**, v. 37, n. 1, p. 56-62, 2014.

SANTOS, F.; EICHLER, P.; DE QUEIROZ, J. H.; GOMES, F. (2020). **Production of second-generation ethanol from sugarcane**. Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives, p. 195–228. doi:10.1016/b978-0-12-814236-3.00011-1.

SANTOS, W. B. R. **Estimativa do potencial de produção de bioetanol da brachiária híbrida CONVERT HD364**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Tocantins. Programa de pós-graduação em Agroenergia. Palmas, 2016.

SCARIOT, A. O.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Reproductive Biology of the Palm *Acrocomia aculeata* in Central Brazil. **Biotropica**, v. 23, n. 1, p. 12-22, 1991. doi:10.2307/2388683.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. 235p.

SILVA FREITAS, L. N.; DE SOUSA, F. P.; CARVALHO, A. R.; PASA, V. M. D. Study of direct synthesis of bio-hydrocarbons from macauba oils using zeolites as catalysts. **Fuel**, 2020. doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119472.

SILVA, L. C. C.; LEMOS, R. C.; CARVALHO, C. G. I.; GOOD-GOD, P. I. V.; OLIVEIRA, L. O.; COSTA, M. D-B. L.; PIOVESAN, N. D.; MOREIRA, M. A. Genetic diversity and structure of macaw palm: implications for genetic variability sampling. **Revista Árvore**. 2017, 41(5): e410508. doi.org/10.1590/1806-90882017000500008.

SILVA, L. N.; FORTES, I. C. P.; DE SOUSA, F. P.; PASA, V. M. D. Biokerosene and green diesel from macauba oils via catalytic deoxygenation over Pd/C. **Fuel**, v. 164, p. 329–38, 2016. doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.081.

SIMIQUÉLI, G. F.; RESENDE, M. D. V. DE.; MOTOIKE, S. Y.; HENRIQUES, E. Inbreeding depression as a cause of fruit abortion in structured populations of macaw palm (*Acrocomia*

- aculeata): Implications for breeding programs. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 652–659, 2018. doi:10.1016/j.indcrop.2017.12.068.
- SOUSA, I. J. A. **Diferentes concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no pré tratamento de biomassas residual na produção de etanol 2g**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Tocantins. Programa de pós-graduação em Agroenergia. Palmas, 2020.
- SOUZA, J. N. e.; AGOSTINHO, C. de O.; RIBEIRO, L. M.; AZEVEDO, A. M.; LOPES, P. S. N. Edaphic and climatic control of macaúba palm seed bank dynamics. **Industrial Crops and Products**, v. 141, p. 111802, 2019. doi:10.1016/j.indcrop.2019.111802.
- SU, T.; ZHAO, D.; KHODADADI, M.; LEN, C. Lignocellulosic biomass for bioethanol: Recent advances, technology trends and barriers to industrial development. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 24, p. 56–60, 2020. doi:10.1016/j.cogsc.2020.04.005.
- SUDIYANI, Y.; DAHNUM, D.; BURHANI, D.; PUTRI, A. M. H. (2019). **Evaluation and comparison between simultaneous saccharification and fermentation and separated hydrolysis and fermentation process**. Second and Third Generation of Feedstocks, p. 273–290. doi:10.1016/b978-0-12-815162-4.00010-0.
- SUN, S.; SUN, S.; CAO, X.; SUN, R. The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. **Bioresource Technology**, v. 199, p. 49-58, 2016.
- SURUP, G. R.; HUNT, A. J.; ATTARD, T.; BUDARIN, V. L.; FORSBERG, F.; ARSHADI, M.; ABDELSAYED, V.; SHEKHAWAT, D.; TRUBETSKAYA, A. The effect of wood composition and supercritical CO<sub>2</sub> extraction on charcoal production in ferroalloy industries. **Energy**, v. 193, p. 116696, 2020. doi:10.1016/j.energy.2019.116696.
- TANG, S.; LIU, W.; HUANG, C.; LAI, C.; FAN, Y.; YONG, Q. Improving the enzymatic hydrolysis of larch by coupling water pre-extraction with alkaline hydrogen peroxide post-treatment and adding enzyme cocktail. **Bioresource Technology**, v. 285, p. 121322, 2019. doi:10.1016/j.biortech.2019.121322.
- TEIXEIRA, G. M.; SANTANA, L. S. F.; ALVES, Y. A.; CAMPOS, L. M. A.; ALMEIDA, S. Q. **Análise da eficiência do pré-tratamento por explosão a vapor da fibra do mesocarpo do coco**. XVII SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS, 2018. Disponível em: <http://www.revistas.unifacs.br/index.php/sepa>. Acesso em: 23 dez. 2020.
- THEODOROU, M. K.; WILLIAMS, B. A.; DHANOA, M. S.; McALLAN, A. B.; FRANCE, J. A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetic of ruminant feeds. **Animal Feed Science and Technology**, v. 48, n. 3, p. 185-197, 1994.
- TILAHUN, W. W.; SARAIVA GROSSI, J. A.; FAVARO, S. P. Mesocarp oil quality of macauba palm fruit improved by gamma irradiation in storage. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 168, p. 108575, 2020. doi:10.1016/j.radphyschem.2019.108575.
- TIMUNG, R.; MOHAN, M.; CHILUKOTI, B.; SASMAL, S.; BANERJEE, T.; GOUD, V. V. Optimization of dilute acid and hot water pretreatment of different lignocellulosic biomass: A comparative study. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 9–18, 2015. doi:10.1016/j.biombioe.2015.05.006.

TINÔCO, D.; ANDRÉ GENIER, H. L.; BATISTA DA SILVEIRA, W. Technology valuation of cellulosic ethanol production by *Kluyveromyces marxianus* CCT 7735 from sweet sorghum bagasse at elevated temperatures, **Renewable Energy**, doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.132.

TOQUERO, C.; BOLADO, S. Effect of four pretreatments on enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation of wheat straw. Influence of inhibitors and washing. **Bioresource Technology**, v. 157, p. 68-76, 2014.

VAN SOEST, P.J.; ROBERTSON, J.B.; LEWIS, B.A. Methods for dietary fiber neutral detergent and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science**, v.74, n.10, p. 3583-3597, 1991.

VERARDI, A.; BLASI, A.; MARINO, T.; MOLINO, A.; CALABRÒ, V. Effect of steam-pretreatment combined with hydrogen peroxide on lignocellulosic agricultural wastes for bioethanol production: Analysis of derived sugars and other by-products. **Journal of Energy Chemistry**, v. 27, n. 2, p. 535–543, 2018. doi:10.1016/j.jechem.2017.11.007.

VISWANATHAN, B. (2017). **Petroleum**. Energy Sources, p. 29–57. doi:10.1016/b978-0-444-56353-8.00002-2.

VU, H. P.; NGUYEN, L. N.; VU, M. T.; JOHIR, M. A. H.; MCLAUGHLAN, R.; NGHIEM, L. D. (2020). A comprehensive review on the framework to valorise lignocellulosic biomass as biorefinery feedstocks. **Science of The Total Environment**, p. 140630. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140630.

WANG, F.; OUYANG, D.; ZHOU, Z.; PAGE, S. J.; LIU, D.; ZHAO, X. (2020). Lignocellulosic biomass as sustainable feedstock and materials for power generation and energy storage. **Journal of Energy Chemistry**. doi:10.1016/j.jechem.2020.08.060.

WANG, G.; XIA, Y.; SUI, W.; SI, C. Lignin as a novel tyrosinase inhibitor: effects of sources and isolation processes. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 7, p. 9510-9518, 2018.

WANG, J.; O'DONNELL, J.; BRANDT, A. R. Potential solar energy use in the global petroleum sector. **Energy**, v. 118, p. 884–892, 2017. doi:10.1016/j.energy.2016.10.107.

WEI, H.; YINGTING, Y.; JINGJING, G.; WENSHI, Y.; JUNHONG, T. (2017). **Lignocellulosic Biomass Valorization: Production of Ethanol**. Encyclopedia of Sustainable Technologies, p. 601–604. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.10239-8.

WEISS, R.; GUEBITZ, G. M.; PELLIS, A.; NYANHONGO, G. S. (2020). **Harnessing the Power of Enzymes for Tailoring and Valorizing Lignin**. Trends in Biotechnology. doi:10.1016/j.tibtech.2020.03.010.

WU, Y.; GE, S.; XIA, C.; MEI, C.; KIM, K.-H.; CAI, L.; SMITH, L. M.; LEE, J.; SHI, S. Q. Application of intermittent ball milling to enzymatic hydrolysis for efficient conversion of lignocellulosic biomass into glucose. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 136, p. 110442, 2021. doi:10.1016/j.rser.2020.110442.

- YANG, L.; RU, Y.; XU, S.; LIU, T.; TAN, L. Features correlated to improved enzymatic digestibility of corn stover subjected to alkaline hydrogen peroxide pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 325, p. 124688, 2021. doi:10.1016/j.biortech.2021.124688.
- YOUSUF, A.; PIROZZI, D.; SANNINO, F. (2020). **Fundamentals of lignocellulosic biomass**. Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels, p. 1–15. doi:10.1016/b978-0-12-815936-1.00001-0.
- YU, J.; PATERSON, N.; BLAMEY, J.; MILLAN, M. Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Fuel**, v. 191, p. 140–149, 2017. doi:10.1016/j.fuel.2016.11.057.
- YU, X.; SANDHU, N. S.; YANG, Z.; ZHENG, M. Suitability of energy sources for automotive application – A review. **Applied Energy**, v. 271, p. 115169, 2020. doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115169.
- YUAN, Z.; LONG, J.; ZHANG, X.; WANG, T.; SHU, R.; MA, L. Intensification effect of peroxide hydrogen on the complete dissolution of lignocellulose under mild conditions. **RSC Advances**, 6(47), p. 41032–41039, 2016. doi:10.1039/c6ra06687a.
- ZEVALLOS TORRES, L. A.; LORENCI WOICIECHOWSKI, A.; DE ANDRADE TANOBE, V. O.; KARP, S. G.; GUIMARÃES LORENCI, L. C.; FAULDS, C.; SOCCOL, C. R. Lignin as a potential source of high-added value compounds: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121499, 2020. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121499.
- ZHANG, H.; HAN, L.; DONG, H. An insight to pretreatment, enzyme adsorption and enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: Experimental and modeling studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 140, p. 110758, 2021. doi:10.1016/j.rser.2021.110758.
- ZHANG, J.; ZHOU, H.; LIU, D.; ZHAO, X. (2020). **Pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient enzymatic saccharification of cellulose**. In: Sannino F, Pirozzi D (eds) Yousuf A. Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels, Elsevier, p. 17–65. doi.org/10.1016/B978-0-12-815936-1.00002-2.
- ZHAO, F.; FAN, Y.; ZHANG, S. Assessment of efficiency improvement and emission mitigation potentials in China's petroleum refining industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124482, 2021. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124482.