



Potencial dos resíduos de *Agave sisalana* na produção de biocombustíveis de segunda geração: revisão sistemática

doi®

<https://doi.org/10.47236/2594-7036.2025.v9.1686>

Mirella Riva¹

Daiane Cecchin²

Juliana Lobo Paes³

Guilherme Benko Siqueira⁴

Data de submissão: 27/3/2025. Data de aprovação: 26/6/2025. Data de publicação: 10/7/2025.

Resumo – O agave é amplamente cultivado no Brasil, e cerca de 96% da planta é descartada como resíduo após a extração das fibras. Essa biomassa, rica em celulose, hemicelulose e lignina, oferece um potencial elevado para a produção de bioetanol. Este artigo objetivou analisar as rotas tecnológicas para a conversão de resíduos industriais de *Agave sisalana* em biocombustíveis de segunda geração. Fez-se uma revisão sistemática utilizando as bases de dados Scopus e Google Scholar, abrangendo publicações no período de 2015 a 2024. Para tal, empregaram-se as seguintes palavras-chaves: “agave AND residues OR biofuels AND from AND agave” e “agave residues” e “Sustainable processing Agave”. Foram analisadas 38 publicações que abordam os temas pré-tratamento, hidrólise e fermentação para a conversão dos resíduos de agave em biocombustíveis. Os resultados demonstraram que o bagaço de agave pode ser eficientemente convertido em etanol por meio de pré-tratamentos como auto-hidrólise e explosão a vapor, com rendimentos de etanol superiores a 85%. No entanto, a viabilidade econômica ainda enfrenta desafios, especialmente relacionados à otimização dos coquetéis enzimáticos e à integração de novas tecnologias. Conclui-se que os resíduos de sisal representam uma solução sustentável para a produção de bioenergia, contribuindo assim para a economia circular e a mitigação de impactos ambientais.

Palavras-chave: *Agave sisalana*. Biocombustíveis de segunda geração. Bioetanol. Pré-tratamento. Resíduos agroindustriais.

Potential of *Agave sisalana* residues in the production of second-generation biofuels: a systematic review

Abstract – Agave is widely cultivated in Brazil, with 96% of the plant being discarded as waste after fiber extraction. This biomass, rich in cellulose, hemicellulose, and lignin, offers high potential for bioethanol production. This study aimed to analyze the technological pathways for converting *Agave sisalana* industrial residues into second-generation biofuels. A systematic review was conducted using the Scopus and Google Scholar databases, covering publications

¹ Mestranda em Agroenergia Digital pela Universidade Federal do Tocantins. Palmas, Tocantins, Brasil. mirella.riva@mail.uft.edu.br <https://orcid.org/0009-0008-7944-7337> <http://lattes.cnpq.br/5335078562320421>.

² Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras. Professora da Universidade Federal Fluminense e do Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital da Universidade Federal do Tocantins. Niterói, Rio de Janeiro, Brasil. daianececchin@id.uff.br <https://orcid.org/0000-0002-6098-1846> <http://lattes.cnpq.br/6666655331177147>.

³ Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Professora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e do Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital da Universidade Federal do Tocantins. Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil. juliana.lobop@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-9301-0547> <http://lattes.cnpq.br/8567579362150921>.

⁴ Doutor em Zootecnia pela Universidade Federal de Lavras. Professor da Universidade Federal do Tocantins. Palmas, Tocantins, Brasil. guibenko@uft.edu.br <https://orcid.org/0000-0002-0572-2788> <http://lattes.cnpq.br/3964828601706257>.

from 2015 to 2024. The following keywords were used: “agave and residues or biofuels and from and agave,” “agave residues,” and “sustainable processing Agave.” A total of 38 publications addressing pretreatment, hydrolysis, and fermentation processes for the conversion of Agave residues into biofuels were analyzed. The results demonstrated that Agave bagasse can be efficiently converted into ethanol through pretreatment methods such as autohydrolysis and steam explosion, achieving ethanol yields above 85%. However, the economic viability still faces challenges, especially related to the optimization of enzymatic cocktails and the integration of new technologies. It is concluded that sisal residues represent a sustainable solution for bioenergy production, thus contributing to the circular economy and the mitigation of environmental impacts.

Keywords: Agave sisalana. Bioethanol. Second-generation biofuels. Pretreatment. Agro-industrial residues.

Potencial de los residuos de Agave sisalana en la producción de biocombustibles de segunda generación: revisión sistemática

Resumen – El agave se cultiva ampliamente en Brasil, y cerca del 96 % de la planta se descarta como residuo tras la extracción de las fibras. Esta biomasa, rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, ofrece un alto potencial para la producción de bioetanol. Este artículo tuvo como objetivo analizar las rutas tecnológicas para la conversión de residuos industriales de *Agave sisalana* en biocombustibles de segunda generación. Se realizó una revisión sistemática utilizando las bases de datos Scopus y Google Scholar, abarcando publicaciones del período de 2015 a 2024. Para ello, se emplearon las siguientes palabras clave: “agave AND residues OR biofuels AND from AND agave”, “agave residues” y “Sustainable processing Agave”. Se analizaron 38 publicaciones que abordan los temas de pretratamiento, hidrólisis y fermentación para la conversión de los residuos de agave en biocombustibles. Los resultados demostraron que el bagazo de agave puede convertirse eficientemente en etanol mediante pretratamientos como la autohidrólisis y la explosión de vapor, con rendimientos de etanol superiores al 85 %. No obstante, la viabilidad económica aún enfrenta desafíos, especialmente relacionados con la optimización de los cócteles enzimáticos y la integración de nuevas tecnologías. Se concluye que los residuos de sisal representan una solución sostenible para la producción de bioenergía, contribuyendo así a la economía circular y a la mitigación de los impactos ambientales.

Palabras clave: *Agave sisalana*. Biocombustibles de segunda generación. Bioetanol. Pretratamiento. Residuos agroindustriales.

Introdução

A história da energia mundial é marcada pela evolução de suas fontes, desde o carvão mineral da Primeira Revolução Industrial até o petróleo da Segunda Revolução Industrial. A crescente preocupação com o esgotamento dos combustíveis fósseis e seus impactos ambientais tem impulsionado a busca por fontes de energia renováveis. Nesse contexto, visando à produção sustentável de diversos produtos a partir da biomassa, os biocombustíveis, em particular, são considerados por muitos governos como uma estratégia para reduzir a dependência de recursos não renováveis e mitigar as mudanças climáticas (Rios-González *et al.*, 2017).

A energia de biomassa, por ser uma fonte renovável e de baixo impacto ambiental, tem despertado grande interesse por parte dos países em todo o mundo. Dentre as fontes de energia renovável, a biomassa tem se destacado globalmente por seu baixo custo de implantação e por ser considerada uma fonte limpa, alinhada aos princípios da sustentabilidade. Seu uso contribui significativamente para a redução da poluição do ar e da água, resultante do descarte inadequado de resíduos agropecuários. Nesse contexto, as políticas energéticas de diversos

países têm incentivado cada vez mais a implantação de usinas de biomassa e bioenergia como estratégia para mitigar os impactos ambientais (Nakada *et al.*, 2014 *apud* Silva *et al.*, 2021). Como um dos recursos mais abundantes e renováveis do planeta, a biomassa lignocelulósica (LCB) oferece um vasto potencial para a produção de biocombustíveis e outros produtos de valor agregado, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e promovendo um futuro mais sustentável (Kumar; Ram, 2021).

O Brasil é líder mundial em produção e uso de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, conforme demonstrado pelo Ministério de Minas e Energia (Brasil, 2024) por meio dos dados do Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que registrou que o etanol e o biodiesel somaram quase 43 milhões de litros em 2023, o que evidencia o alto potencial da produção de biocombustíveis pelo país.

A biomassa, principalmente de plantas oleaginosas, apresenta-se como uma alternativa promissora para a produção de biocombustíveis, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais (Azevedo; Lima, 2016). No entanto, a competição por terras agricultáveis e a disponibilidade hídrica são desafios a serem superados.

Espécies como o agave, adaptadas a regiões semiáridas e com alta produtividade de biomassa, destacam-se como promissoras para a produção de bioetanol (Yang *et al.*, 2015). Seu cultivo em áreas marginais diminui a competição por terras e recursos hídricos, contribuindo, assim, para a sustentabilidade do processo.

A valorização de resíduos agroindustriais, como os do sisal, representa uma oportunidade para a produção de biocombustíveis de segunda geração, reduzindo o impacto ambiental e gerando produtos com valor agregado. O sisal, em particular, apresenta um grande potencial, uma vez que sua biomassa residual pode ser convertida em biogás, biocombustíveis e outros produtos (FAO, 2024; Ogbu; Okechukwu, 2023).

Apesar do potencial, a conversão de resíduos industriais de sisal em biocombustíveis ainda enfrenta desafios, como a necessidade de desenvolvimento de tecnologias eficientes e a otimização dos processos. No entanto, a pesquisa e o desenvolvimento nessa área são essenciais para garantir a sustentabilidade energética e ambiental do país.

O presente trabalho tem como objetivo analisar as diferentes rotas tecnológicas para a conversão dos resíduos industriais de sisal em biocombustíveis, avaliando seu potencial como fonte renovável de energia. Além disso, o estudo busca identificar os principais desafios e discutir as perspectivas futuras para o desenvolvimento sustentável dessa tecnologia.

Características dos resíduos de agave: composição química e disponibilidade

A fibra de sisal (*Agave sisalana*), líder mundial em produção de fibras, é obtida das folhas de agave, com rendimento de apenas 4%; os 96% restantes são atualmente considerados resíduos do processo industrial (Daher *et al.*, 2023).

O sisal é uma cultura que, além de fornecer fibras para diversos fins, possui um enorme potencial de aproveitamento de seus resíduos. Cerca de 95% da planta, atualmente descartados, contém compostos bioativos com aplicações em farmacêutica, cosmética, alimentação e produção de energia. A valorização desses resíduos não apenas reduz o impacto ambiental, mas também gera novas oportunidades de negócios e promove o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis (Yogi; Garusti; Santoso, 2021).

As folhas de agave representam mais de 60% da biomassa total da planta e são, atualmente, subprodutos sem grande valor comercial. No entanto, esses resíduos agroindustriais possuem um alto potencial para a produção de biocombustíveis e bioproductos, abrindo caminho para a criação de biorrefinarias (Flores-Gómez *et al.*, 2018).

Kumar e Ram (2021) destacam o potencial da biomassa de agave para a produção de produtos de valor agregado: o resíduo é uma fonte promissora de bioenergia com diversas

aplicações, como na produção de biocombustíveis, ração animal, xarope de frutas, fertilizantes e plástico biodegradável e na indústria de celulose e papel, entre outras.

A indústria do sisal, cujo principal produtor mundial é o Brasil, gera um volume significativo de suco de sisal como subproduto da extração da fibra. A conversão desse efluente em biocombustível representa uma oportunidade para promover a sustentabilidade da cadeia produtiva do sisal, agregando valor a um recurso atualmente subutilizado e reduzindo o impacto ambiental (Soares *et al.*, 2024). Conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) referentes ao ano de 2022 (Brasil, 2023), a Bahia lidera amplamente a produção de sisal no país, concentrando 95,6% da produção nacional, seguida pela Paraíba (4,3%) e pelo Ceará (0,1%).

De acordo com Palomo-Briones *et al.* (2018), o bagaço de agave é o principal resíduo sólido gerado pela indústria de tequila no México. Trata-se de uma biomassa lignocelulósica com estrutura complexa constituída por celulose, hemicelulose e lignina.

Segundo Caspeta *et al.* (2014), o bagaço do sisal é composto de 43% de celulose, 19% de hemicelulose e 15% de lignina em peso seco, é possível liberar até 60% dos açúcares fermentáveis por meio de processos termoquímicos e enzimáticos, isso indica potencial para a produção de biocombustíveis e outros produtos de valor agregado.

Lázaro-Romero *et al.* (2024) apontam que o bagaço de agave, rico em celulose (cerca de 42-44,5%), hemicelulose (20-25,3%) e lignina (15-20,1%), apresenta alto potencial para a produção de biomateriais. No entanto, apesar de sua composição promissora, o aproveitamento completo dessa biomassa ainda é um desafio. São necessárias investigações focadas na otimização da extração de celulose para transformar o bagaço de agave numa matéria-prima de valor para a indústria.

A rica composição do bagaço de agave em celulose, hemicelulose e lignina o posiciona como uma excelente matéria-prima para a produção de biocombustíveis. Além do bioetanol obtido a partir da fermentação de açúcares, a fração lignocelulósica pode ser convertida em biogás por meio da digestão anaeróbia. No entanto, a viabilidade econômica da produção de biocombustíveis a partir do agave depende do desenvolvimento de tecnologias eficientes e otimizadas para a conversão da biomassa.

Processos de produção de etanol de segunda geração

Os biocombustíveis podem ser classificados como de primeira, segunda e outras gerações. A produção de bioetanol varia de acordo com a matéria-prima utilizada. A primeira geração emprega açúcares e amidos, como melaço e milho, enquanto a segunda e a terceira gerações utilizam, respectivamente, materiais lignocelulósicos e algas. O processo de produção envolve etapas como pré-tratamento, hidrólise (apenas para matérias-primas lignocelulósicas e algas), fermentação e destilação (Parascanu *et al.*, 2021).

A produção de bioetanol de segunda geração compreende três etapas sequenciais: pré-tratamento, sacarificação enzimática e fermentação. O pré-tratamento tem como objetivo aumentar a acessibilidade dos polímeros da biomassa, como a celulose e a hemicelulose. A sacarificação, por sua vez, libera os açúcares fermentáveis por meio da ação de enzimas. A fermentação, realizada por microrganismos, converte esses açúcares em etanol. A otimização de cada etapa, especialmente a sacarificação, com o uso de altas concentrações de sólidos, é fundamental para a eficiência e a viabilidade econômica do processo (Aguilar *et al.*, 2018).

A complexidade da biomassa lignocelulósica exige um pré-tratamento para liberar os açúcares e torná-los fermentáveis. Esse processo, que pode representar uma parcela significativa dos custos de produção, pode ser realizado por meio de diversas técnicas, incluindo tratamentos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos, cada um com suas vantagens e desvantagens (Hernández-Vázquez; Hernández; Ortiz 2020).

Acrescentam Flores-Gómez *et al.* (2018) que a produção de biocombustíveis por rotas bioquímicas depende de pré-tratamento eficiente para liberar os açúcares presentes na biomassa. Embora existam diversas tecnologias para esse fim, a maioria gera subprodutos que inibem as enzimas e microrganismos envolvidos nos processos posteriores. Pré-tratamentos ácidos, como explosão de vapor e água quente líquida, são promissores por seus altos rendimentos de açúcar. No entanto, as altas temperaturas empregadas nesses processos levam à formação de compostos que podem prejudicar a produção de etanol.

Palomo-Briones *et al.* (2018) citam que a hidrólise, ou sacarificação, é um processo que visa solubilizar a celulose e a hemicelulose presentes na biomassa, gerando um líquido rico em açúcares fermentáveis. Para o bagaço de agave, tanto tratamentos químicos (hidrólise ácida) quanto biológicos (hidrólise enzimática) foram avaliados. A hidrólise ácida, embora eficiente, é influenciada por condições como temperatura e concentração de ácido. Já a hidrólise enzimática, que utiliza um coquetel de enzimas, apresenta grande potencial, mas ainda requer otimização.

Rios-González *et al.* (2017) destacam que a conversão de materiais lignocelulósicos (LCM) com pré-tratamentos como explosão a vapor, expansão com amônia e tratamentos ácido-base rompe as ligações entre celulose, hemicelulose e lignina, tornando a biomassa mais suscetível à ação de enzimas e permitindo a liberação de açúcares fermentáveis. Além disso, explanam que a auto-hidrólise, um processo simples e ecologicamente correto, utiliza apenas água para pré-tratar materiais lignocelulósicos, liberando principalmente os açúcares da hemicelulose e viabilizando economicamente a produção de etanol de segunda geração.

A fermentação alcoólica é um processo biológico no qual açúcares são convertidos em etanol e dióxido de carbono por leveduras. Fatores como temperatura, pH e a presença de substâncias inibidoras influenciam a eficiência dessa conversão. A produção de etanol por fermentação é possível a partir de diversas matérias-primas que contenham açúcares fermentáveis. Microrganismos como bactérias, leveduras e fungos podem converter esses açúcares em etanol e dióxido de carbono (Barrera *et al.*, 2016). A levedura *Saccharomyces cerevisiae* é amplamente utilizada na indústria para produzir etanol a partir de hexoses (como a glicose da celulose) devido à sua alta eficiência. No entanto, sua limitação na fermentação de pentoses da hemicelulose exige o uso de linhagens geneticamente modificadas ou de outros microrganismos capazes de metabolizar esses açúcares (Basso *et al.*, 2023).

Por fim, Malik *et al.* (2020) citam que a fermentação, etapa crucial na produção de etanol, converte açúcares em álcool por ação de microrganismos. O produto resultante, uma mistura de água e etanol, demanda destilação para purificação. Um pré-tratamento eficaz maximiza a extração de açúcares fermentáveis, minimiza a formação de substâncias inibitórias e reduz custos.

Materiais e métodos

O estudo foi conduzido com o objetivo de responder à seguinte questão de pesquisa: quais são as rotas tecnológicas mais eficazes para a conversão de resíduos agroindustriais de *Agave sisalana* em biocombustíveis de segunda geração?

Para a busca na base de dados Scopus foram utilizadas as seguintes palavras-chave/operadores booleanos: “agave AND residues OR biofuels AND from AND agave”. No Google Scholar (GS), as palavras-chave utilizadas foram “agave residues” e “Sustainable processing Agave”.

Foram aplicados critérios para inclusão e exclusão. Os critérios de inclusão são: estudos publicados entre 2015 e 2024, que tratem do tema de pré-tratamento, hidrólise e fermentação para a conversão dos resíduos de agave em biocombustíveis, disponíveis em idiomas inglês e português e publicados em periódicos indexados à base Scopus ou Google Scholar. Já os

critérios de exclusão são: estudos que não tratem da temática abordada, estudos duplicados, teses ou dissertações não publicadas e artigos que não estejam disponíveis na íntegra.

No Google Scholar, a busca resultou em 200 artigos para cada palavra-chave, totalizando 400 para o período de 2015 a 2024. Na Scopus, foram recuperadas 325 publicações no total. Após a aplicação dos filtros de período (2015 a 2024) e tipo de documento (artigos e artigos de conferência), foram selecionados 291 documentos para análise.

A seleção dos estudos foi conduzida em três etapas: 1) Leitura de títulos e resumos: estudos duplicados foram removidos e os títulos e resumos foram avaliados de acordo com os critérios de inclusão e exclusão; 2) Leitura completa dos textos: os artigos selecionados na etapa anterior foram lidos na íntegra para verificar sua relevância e adequação ao tema; e 3) Análise de qualidade: os estudos incluídos foram avaliados quanto a estudos primários que abordam a conversão de resíduos de agave em biocombustíveis e aqueles que tinham dados experimentais. Ao final, 38 artigos foram selecionados para análise detalhada, garantindo a qualidade e a relevância científica das fontes incluídas.

Resultados e discussões

A análise dos estudos selecionados mostra que os resíduos de *Agave sisalana* possuem grande potencial para a produção de biocombustíveis de segunda geração. O bagaço de agave, por exemplo, apresenta uma composição química de aproximadamente 43% de celulose, 19% de hemicelulose e 15% de lignina, componentes desenvolvidos para a conversão em bioetanol (Caspeta *et al.*, 2014). A composição lignocelulósica, rica em celulose, hemicelulose e lignina, permite a produção de bioetanol por meio de diferentes rotas tecnológicas. No entanto, a eficiência dessa conversão depende diretamente dos métodos de pré-tratamento e hidrólise enzimática aplicados e das condições operacionais dos processos de fermentação. A eficiência desses processos está intimamente ligada à otimização de parâmetros como temperatura e tempo de residência (Caspeta *et al.*, 2014). Além disso, a viabilidade econômica enfrenta desafios relacionados à otimização dos coquetéis enzimáticos (Kumar; Ram, 2021).

Estudos de Rios-González *et al.* (2017) e Shiva *et al.* (2023) obtiveram, respectivamente, 74,3% e 82,58% de glicose a partir do bagaço de agave após auto-hidrólise, enquanto a fermentação subsequente atingiu um rendimento de etanol de 98,4% do valor teórico no trabalho de Rios-González *et al.* (2017). Outros estudos, como o de Flores-Gómez *et al.* (2018), ao aplicarem expansão com amônia (AFEX), relataram conversões superiores a 85% para açúcares fermentáveis e títulos de etanol superiores a 40 g/L.

Estudo de Rijal *et al.* (2016) avaliou o efeito de diferentes condições de pré-tratamento ácido na digestibilidade e sacarificação enzimática das folhas de agave. Foram avaliados o tempo de tratamento, a temperatura e a concentração de ácido sulfúrico. Os resultados mostraram que o pré-tratamento com 2,0% de H₂SO₄ por 60 minutos a 121°C aperfeiçoou a recuperação de glicose, atingindo 70% do valor teórico. A fermentação alcoólica utilizando *Saccharomyces cerevisiae* foi eficiente tanto para hidrolisados de bagaço quanto de suco de agave, com rendimentos de etanol de até 38,6 g/L e 12,4 g/L, respectivamente, indicando o potencial do agave como promissor na produção de bioetanol.

Por outro lado, o estudo de Delfin-Ruiz *et al.* (2021), ao melhorar as condições de pré-tratamento alcalino e hidrólise enzimática por meio de um planejamento experimental Box-Behnken, alcançou rendimentos de etanol de até 0,47 g/g e produtividades volumétricas de 1,97 g/L/h. Esses resultados reforçam o grande potencial do bagaço de agave para a produção de bioetanol.

Comparando os métodos, observa-se que o pré-tratamento alcalino desenvolvido por Delfin-Ruiz *et al.* (2021) apresentou um rendimento de etanol superior ao método ácido proposto por Rijal *et al.* (2016). Isso sugere que a escolha do tipo de pré-tratamento impacta diretamente o rendimento final do bioetanol, ressaltando a importância de estratégias que

maximizem a recuperação de açúcares fermentáveis. Além disso, enquanto o pré-tratamento ácido visa à digestibilidade da celulose, o processo alcalino demonstra maior eficiência na liberação de açúcares fermentáveis, evidenciando que a escolha do tratamento deve considerar tanto a composição da biomassa quanto os custos operacionais.

Tecnologias emergentes, como o uso de líquidos iônicos e solventes orgânicos, foram avaliadas por Pérez-Pimienta *et al.* (2017), que demonstraram que esses métodos apresentam alta eficiência na deslignificação da biomassa. Segundo os autores, essa abordagem permitiu a conversão de mais de 90% dos componentes celulósicos em açúcares fermentáveis. Os resultados sugerem que a escolha do pré-tratamento deve ser estratégica, considerando tanto a estrutura da biomassa quanto o custo e a eficiência energética do processo.

Em relação ao desempenho de pré-tratamentos e hidrólise enzimática, os resultados dos diferentes estudos indicam que o pré-tratamento é uma etapa crítica para liberar açúcares fermentáveis da biomassa lignocelulósica. A tabela 1 reúne os principais pré-tratamentos revisados, suas condições de hidrólise e os respectivos rendimentos de açúcares e etanol.

Tabela 1 – Principais pré-tratamentos revisados, suas condições de hidrólise e os respectivos rendimentos de açúcares e etanol

ESTUDO	MATÉRIA-PRIMA	PRÉ-TRATAMENTO	AÇÚCARES (%)	ETANOL (g/L ou g/g)
Rios-González <i>et al.</i> (2017)	Bagaço	Auto-hidrólise	74,3	98,4% do teor teórico
Flores-Gómez <i>et al.</i> (2018)	Bagaço e folhas	Expansão com amônia (AFEX)	> 85	> 40 g/L
Caspeta <i>et al.</i> (2014)	Bagaço	Etanosolv	91	86% do teor teórico
Ávila-Gaxiola e Ávila-Gaxiola (2022)	Folhas	Moagem seca + hidrólise	86,4	81% do teor teórico
Rijal <i>et al.</i> (2016)	Folhas	H ₂ SO ₄ 2%, 60 min, 121°C	70	38,6 g/L (bagaço); 12,4 g/L (suco)
Delfin-Ruiz <i>et al.</i> (2021)	Bagaço	Alcalino otimizado	Não reportado	0,47 g/g; 1,97 g/L/h
Pérez-Pimienta <i>et al.</i> (2017)	Bagaço	Líquidos iônicos + Organosolv	> 90 glucana, 83 xilana	121-127 kg/100 kg
Aguirre-Fierro <i>et al.</i> (2020)	Bagaço	Hidrotérmico oxidativo	75,8	110,5 g/L
Shiva <i>et al.</i> (2023)	Bagaço	Auto-hidrólise	82,58	40,98 g/L glicose

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A eficiência de conversão dos açúcares liberados em etanol variou entre os estudos analisados, refletindo diferenças nas condições de fermentação e nas cepas de levedura utilizadas. Flores-Gómez *et al.* (2018) relataram rendimentos de etanol superiores a 40 g/L com uma conversão de mais de 85% em açúcares, enquanto Ávila-Gaxiola e Ávila-Gaxiola (2022) alcançaram rendimentos de até 0,41 g/g, correspondendo a uma alta eficiência teórica de 81%. Ambos os, estudos exploraram o uso da levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Esses resultados indicam que, além do pré-tratamento, a seleção e a otimização das condições de fermentação são fundamentais para maximizar a produção de etanol.

Ávila-Gaxiola e Ávila-Gaxiola (2022) destacam a *Saccharomyces cerevisiae* como a levedura de escolha para a produção industrial de etanol em virtude de sua comprovada

capacidade fermentativa. Os autores concluem que a utilização das folhas de agave como substrato, em combinação com a fermentação alcoólica catalisada pela *S. cerevisiae*, representa uma alternativa promissora para a obtenção de bioetanol. Essa abordagem pode ser expandida para outros resíduos lignocelulósicos, fomentando o desenvolvimento de um setor bioenergético regional mais diversificado e sustentável.

Estudos como os de Pérez-Pimienta *et al.* (2017) e Ávila-Gaxiola e Ávila-Gaxiola (2022), que combinam o uso de pré-tratamentos inovadores com fermentação mediada por microrganismos geneticamente modificados, como *Escherichia coli* e *Saccharomyces cerevisiae*, também demonstraram ganhos significativos na conversão de biomassa em bioetanol. A adoção de tais tecnologias em larga escala poderá impactar positivamente a economia circular, ao mesmo tempo que promove a sustentabilidade ambiental por meio do aproveitamento eficiente de resíduos lignocelulósicos.

Em contrapartida, Caspeta *et al.* (2014) destacaram o uso do pré-tratamento etanosolv, que, apesar de sua complexidade, alcançou 91% de açúcares fermentáveis e produziu etanol com 86% de rendimento teórico, demonstrando a viabilidade do processo para aplicação em larga escala. Por fim, o pré-tratamento hidrotérmico oxidativo (HTO) aplicado por Aguirre-Fierro *et al.* (2020) também demonstrou eficiência significativa, com liberação de 75,8% dos açúcares e conversão subsequente em etanol, mostrando que técnicas alternativas e menos convencionais podem ser adaptadas com sucesso para a produção de biocombustíveis a partir do agave.

O estudo de Pérez-Pimienta *et al.* (2017) indica que a aplicação de tecnologias avançadas, como o uso de líquidos iônicos e solventes orgânicos, pode não apenas aumentar a eficiência dos processos, mas também diminuir o impacto ambiental ao permitir a reutilização de solventes e a redução de resíduos tóxicos. Além disso, a utilização de sistemas de sacarificação e fermentação sequencial (SESF), como feito por Pérez-Pimienta *et al.* (2017), mostra que há espaço para melhorias tecnológicas que poderão aumentar ainda mais a viabilidade do agave como fonte de bioetanol.

Líquidos iônicos à base de imidazólio emergiram como promissoras alternativas para o pré-tratamento de biomassa, demonstrando menor impacto ambiental em comparação com métodos tradicionais como os tratamentos ácido, alcalino e organosolv (Kumar; Ram, 2021).

Embora os resultados sejam promissores, alguns desafios tecnológicos ainda precisam ser superados para a implementação industrial em larga escala. A presença de lignina nos resíduos de agave limita a acessibilidade das enzimas aos polissacarídeos, reduzindo a eficiência da hidrólise enzimática. Estudo de Caspeta *et al.* (2014) demonstrou que o uso do pré-tratamento etanosolv foi eficaz para aumentar a digestibilidade, elevando a recuperação de açúcares fermentáveis para 91%.

Outro desafio significativo para a viabilidade econômica da produção de biocombustíveis a partir de biomassa lignocelulósica é o alto custo dos coquetéis enzimáticos. Embora tecnologias emergentes como líquidos iônicos e solventes orgânicos demonstrem potencial para otimizar a deslignificação e a sacarificação, seus custos elevados e a necessidade de maior desenvolvimento tecnológico ainda limitam sua aplicação comercial. De acordo com Kumar e Ram (2021), o custo dos líquidos iônicos pode variar de US\$ 1 a US\$ 800 por quilograma.

A análise dos artigos científicos demonstra o grande potencial dos resíduos de *Agave sisalana* como matéria-prima para a produção de bioetanol. No entanto, a escalabilidade industrial desse processo ainda depende de avanços significativos em pesquisa e desenvolvimento. A otimização dos processos de pré-tratamento, a redução dos custos com enzimas e o desenvolvimento de novas tecnologias são cruciais para tornar a produção de bioetanol a partir do agave economicamente viável e ambientalmente sustentável.

Considerações finais

Os resíduos de sisal emergem como uma promissora fonte renovável para a produção de biocombustíveis, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e a mitigação das mudanças climáticas.

Embora a viabilidade econômica em larga escala ainda apresente desafios, o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e a implementação de políticas públicas adequadas podem impulsionar esse setor. A otimização de processos como o pré-tratamento e a utilização de coquetéis enzimáticos são essenciais para aumentar a eficiência da conversão da biomassa em biocombustíveis.

Além disso, a adoção dessa tecnologia em regiões semiáridas, onde o cultivo do sisal é viável, pode gerar diversos benefícios, como o desenvolvimento econômico local, a criação de empregos e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Portanto, para garantir o sucesso dessa iniciativa, é fundamental que o governo estabeleça políticas que incentivem a pesquisa, o desenvolvimento e a utilização de resíduos industriais como matéria-prima para a produção de biocombustíveis.

Referências

AGUILAR, D. L. *et al.* Scale-up and evaluation of hydrothermal pretreatment in isothermal and non-isothermal regimen for bioethanol production using agave. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 112-119, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.100>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852418306230?via%3Dihub>. Acesso em: 10 set. 2024.

AGUIRRE-FIERRO, A. *et al.* Sustainable high-pressure pretreatment of Agave bagasse for ethanol production. **Renewable Energy**, v. 155, p. 1347-1354, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.055>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120305875?via%3Dihub>. Acesso em: 10 set. 2024.

ÁVILA-GAXIOLA, J. C.; ÁVILA-GAXIOLA, E. Ethanol production from *Agave tequilana* leaves powder by *Saccharomyces cerevisiae* yeast applying enzymatic saccharification without detoxification. **Industrial Crops and Products**, v. 177, p. 114515, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114515>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669021012802?via%3Dihub>. Acesso em: 16 set. 2024.

AZEVEDO, A. N. G. de; LIMA, B. G. de A. Biocombustíveis: desenvolvimento e inserção internacional. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 6, n. 1, p. 77-100, 2016. Disponível em: <https://sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/direitoambiental/article/view/2693>. Acesso em: 15 set. 2024.

BARRERA, I. *et al.* Technical and economical evaluation of bioethanol production from lignocellulosic residues in Mexico: Case of sugarcane and blue agave bagasse. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.015>. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 107, p. 91-101, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263876215003895?via%3Dihub>. Acesso em: 17 set. 2024.

BASSO, T. P. *et al.* Engineering xylose fermentation in an industrial yeast: continuous cultivation as a tool for selecting improved strains. **Letters in Applied Microbiology**, v. 76, n. 7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/lambio/ovad077>. Disponível em: <https://academic.oup.com/lambio/article-abstract/76/7/ovad077/7220545?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 20 set. 2024.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento. **Sisal:** Análise mensal. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/busca>. Acesso em: 16 set. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Produção de biocombustíveis cresce no Brasil e alcança recorde histórico.** 17 jul. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-biocombustiveis-cresce-no-brasil-e-alcanca-recorde-historico>. Acesso em: 16 set. 2024.

CASPETA, L. *et al.* Enzymatic hydrolysis at high-solids loadings for the conversion of agave bagasse to fuel ethanol. **Applied Energy**, v. 113, p. 277-286, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.036>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261913006028?via%3Dihub>. Acesso em: 22 set. 2024.

DAHER, C. C. *et al.* Use of sisal industrial waste (*Agave sisalana* Perrine) in sustainable and multifunctional cosmetic products. **International Journal of Cosmetic Science**, v. 45, n. 6, p. 815-833, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/ics.12890>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ics.12890>. Acesso em: 03 out. 2024.

DELFIN-RUIZ, M. E. *et al.* Ethanol Production from Enzymatic Hydrolysates Optimized of *Agave tequilana* Weber var. azul and *Agave karwinskii* bagasses. **BioEnergy Research**, v. 14, p. 785-798, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10196-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-020-10196-7>. Acesso em: 10 out. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). **Fibras do Futuro:** Sisal. Disponível em: <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/en/>. Acesso em: 10 set. 2024.

FLORES-GÓMEZ, C. A. *et al.* Conversion of lignocellulosic agave residues into liquid biofuels using an AFEX™-based biorefinery. **Biotechnology for Biofuels**, v. 11, n. 7, p. 1-18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0995-6>. Disponível em: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-017-0995-6>. Acesso em: 15 set. 2024.

HERNÁNDEZ-VÁZQUEZ, A.; HERNÁNDEZ, S.; ORTIZ, I. Hydrothermal pretreatment of agave bagasse for biomethane production: Operating conditions and energy balance **Biomass and Bioenergy**, v. 142, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105753>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953420302877?via%3Dihub>. Acesso em: 19 set. 2024.

KUMAR, A.; RAM, C. *Agave* biomass: a potential resource for production of value-added products. **Environmental Sustainability**, v. 4, p. 245-259, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s42398-021-00172-y>. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s42398-021-00172-y>. Acesso em: 10 set. 2024.

LÁZARO-ROMERO, A. *et al.* Optimizing cellulose fraction for enhanced utility: Comparative pre-treatment of *Agave tequilana* Weber var. blue bagasse fiber for sustainable applications. **Heliyon**, v. 10, e29149, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29149>. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)05180-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844024051806%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)05180-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844024051806%3Fshowall%3Dtrue). Acesso em: 6 out. 2024.

MALIK, K. *et al.* Enhanced ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* fermentation post acidic and alkali chemical pretreatments of cotton stalk lignocellulose. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 147, p. 104869, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104869>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964830519314118?via%3Dihub>. Acesso em: 19 set. 2024.

OGBU, C. C.; OKECHUKWU, S. N. Agro-Industrial Waste Management: The Circular and Bioeconomic Perspective. In: AHMAD, F.; SULTAN, M. (ed.). **Agricultural Waste – New Insights**. Londres: IntechOpen, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.109181>. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/85597>. Acesso em: 20 set. 2024

PALOMO-BRIONES, R. *et al.* Agave bagasse biorefinery: processing and perspectives. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, p. 1423-1441, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1421-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-017-1421-2>. Acesso em: 16 set. 2024.

PARASCANU, M. M. *et al.* Environmental and economic analysis of bioethanol production from sugarcane molasses and agave juice. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 64374-64393, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15471-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-15471-4>. Acesso em: 17 set. 2024.

PÉREZ-PIMENTA, J. A. *et al.* Sequential enzymatic saccharification and fermentation of ionic liquid and organosolv pretreated agave bagasse for ethanol production. **Bioresource Technology**, v. 225, p. 191-198, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.064>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852416315851?via%3Dihub>. Acesso em: 16 out. 2024.

RIJAL, D. *et al.* Process options for conversion of *Agave tequilana* leaves to bioethanol. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 263-272, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669016300802?via%3Dihub>. Acesso em: 20 set. 2024.

RIOS-GONZÁLEZ, L. J. *et al.* Autohydrolysis pretreatment assessment in ethanol production from agave bagasse. **Bioresource Technology**, v. 242, p. 184-190, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.039>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417303097?via%3Dihub>.
Acesso em: 10 set. 2024.

SHIVA, S. *et al.* Enzymatic Hydrolysis, Kinetic Modeling of Hemicellulose Fraction, and Energy Efficiency of Autohydrolysis Pretreatment Using Agave Bagasse. **Bionergy Research**, v. 16, p. 75-87, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10442-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-022-10442-0>. Acesso em: 14 out. 2024.

SILVA, A. J. M. da *et al.*; Estudo de viabilidade de usina de biogás para geração de energia elétrica em Sítio Novo do Tocantins. **Revista Sítio Novo**, v. 5, n. 3, p. 6-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.47236/2594-7036.2021.v5.i3.6-15p>. Disponível em: <https://sitionovo.ifto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/909>. Acesso em: 14 out. 2024.

SOARES, V. L. *et al.* Potencial de utilização do suco de sisal como matéria-prima para produção biológica sequencial de hidrogênio e metano. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 41, p. 97-108, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43153-023-00342-x>. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43153-023-00342-x>. Acesso em: 16 set. 2024.

YANG, L. *et al.* Biomass characterization of *Agave* and *Opuntia* as potential biofuel feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 76, p. 43-53, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953415000847?via%3Dihub>. Acesso em: 13 out. 2024.

YOGI, Y. A.; GARUSTI, G.; SANTOSO, B. Potential Use of Waste Plant Decortication of Sisal (*Agave sisalana*). **Perspektif**, v. 20, n. 1, p. 01-10, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.21082/psp.v20n1.2021.01-10>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356539189_POTENSI_DAN_PEMANFAATAN_LIMBAH_DEKORTIKASI_TANAMAN_SISAL_Agave_sisalana_Potential_Use_of_Waste_Plant_Decortication_of_SisalAgave_sisalana. Acesso em: 14 out. 2024.

Informações complementares

Descrição	Declaração
Financiamento	Não se aplica.
Aprovação ética	Não se aplica.
Conflito de interesses	Não há.
Disponibilidade dos dados de pesquisa subjacentes	O trabalho não é um <i>preprint</i> e os conteúdos subjacentes ao texto da pesquisa já estão disponíveis.
CrediT	Mirella Riva
	Funções: conceitualização, investigação, administração do projeto, visualização, escrita – rascunho original e escrita – revisão e edição.
	Daiane Cecchin
	Funções: metodologia, supervisão, revisão e edição.
	Juliana Lobo Paes
	Funções: conceitualização, metodologia, administração do projeto e supervisão.
	Guilherme Benko Siqueira
	Funções: conceitualização e metodologia.

Avaliadores: Dr. Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti* (Professor do Instituto Federal da Bahia) e Dra. Keila Lima Sanches** (Professora do Instituto Federal de Brasília).
Revisora do texto em português: Laura Akemi Côrtes Massunari

Artigo Científico

Revisora do texto em inglês: Patrícia Luciano de Farias Teixeira Vidal.

Revisora do texto em espanhol: Graziani França Claudino de Anicézio.

* Optou pela avaliação fechada e autorizou somente a divulgação da identidade como avaliador no trabalho publicado.

** Optou pela avaliação aberta e autorizou somente a divulgação da identidade como avaliadora no trabalho publicado.