

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 14/02/2027

At the author's request, the full text of this thesis will not be available online until
Feb. 14, 2027

JÉSSICA CAROLINA DESSIBIO VIDOTTO

PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO A PARTIR DE FOLHAS DE
Agave sisalana

Botucatu

2025

JÉSSICA CAROLINA DESSIBIO VIDOTTO

**PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO A PARTIR DE FOLHAS DE
*Agave sisalana***

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Profa. Dra. Sarita Cândida Rabelo

Botucatu

2025

V654p	Vidotto, Jéssica Carolina Dessibio Produção de etanol de segunda geração a partir de folhas de Agave sisalana / Jéssica Carolina Dessibio Vidotto. -- Botucatu, 2025 126 p. : il., tabs. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientadora: Sarita Cândida Rabelo 1. Biocombustíveis. 2. Folha de sisal. 3. Etanol de segunda geração. 4. Hidrólise enzimática. 5. Agave sisalana. I. Título.
-------	--

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO A PARTIR DE FOLHAS
DE Agave sisalana

AUTORA: JÉSSICA CAROLINA DESSIBIO VIDOTTO

ORIENTADORA: SARITA CÂNDIDA RABELO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Agrícola, pela
Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SARITA CÂNDIDA RABELO**
Data: 14/08/2025 18:16:43-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. SARITA CÂNDIDA RABELO (Participação Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - Unesp

Documento assinado digitalmente
 **ALINE CARVALHO DA COSTA**
Data: 15/08/2025 14:02:22-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a ALINE CARVALHO DA COSTA (Participação Virtual)
Desenvolvimento de Processos Químicos / Universidade Estadual de Campinas

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO FALSARELLA CARAZZOLLE**
Data: 15/08/2025 08:13:30-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. MARCELO FALSARELLA CARAZZOLLE (Participação Virtual)
Genética e Evolução / Universidade Estadual de Campinas

Botucatu, 14 de agosto de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, com todo o meu carinho, aos meus pais, Êmerson e Luciana, pelo amor incondicional e pelo apoio constante em todas as etapas da minha jornada.

Aos meus avós e tios, pela presença afetuosa, palavras motivadoras e por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos meus amigos, pelo incentivo, paciência e compreensão ao longo deste percurso.

À Profa. Dra. Sarita, minha orientadora, por sua dedicação, pelos ensinamentos valiosos, pela generosidade com seu tempo e por ser um exemplo inspirador de profissional.

E aos colegas do LBPR, pelo apoio diário, parceria e companheirismo que tornaram a rotina de trabalho mais leve e produtiva.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Nada na vida é para ser temido, é apenas para ser compreendido. Agora é hora de compreender mais, para que possamos temer menos”.

Marie Curie.

RESUMO

A *Agave sisalana*, amplamente cultivada no Nordeste brasileiro, possui grande relevância socioeconômica, embora suas folhas sejam pouco aproveitadas na produção de sisal. Como alternativa para agregar valor à cadeia, sua utilização na produção de biocombustíveis desponta como uma solução promissora e sustentável. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o pré-tratamento do bagaço das folhas de *Agave sisalana*, variando o tempo, a temperatura, a concentração de sólidos e de ácido, por meio de um planejamento fatorial fracionado. Os efeitos das variáveis foram analisados a partir da solubilização das frações da biomassa, bem como da conversão dos polissacarídeos na etapa de hidrólise enzimática, realizada tanto com a lama (fração sólida + líquida) quanto com a fração sólida lavada. Também foi avaliado o impacto de possíveis inibidores formados no pré-tratamento nos processos biotecnológicos, assim como a contribuição das pentoses no balanço fermentativo. Os ensaios de pré-tratamento indicaram que a concentração de ácido e a temperatura foram as variáveis mais relevantes para a solubilização da celulose e das hemiceluloses, respectivamente. Na hidrólise enzimática, os inibidores formados durante o pré-tratamento não afetaram significativamente a conversão dos polissacarídeos. Os melhores resultados do balanço global de conversão de celulose e hemiceluloses dos sólidos lavados foram observados para o ensaio 4 (30 min, 200°C, 15% sólidos, sem ácido), com conversões de $70,6 \pm 0,3\%$ e $2,3 \pm 0,1\%$, respectivamente. Já para os ensaios de hidrólise enzimática com a lama, os melhores resultados do balanço global foram observados para o ensaio 2 (30 min, 180°C, 15,0% sólidos, 0,5% ácido), com $60,32 \pm 1,0\%$ de celulose e $80,32 \pm 0,2\%$, de hemiceluloses sendo convertidas. Durante a fermentação, observou-se um efeito inibitório dos compostos presentes no hidrolisado da lama sobre as leveduras fermentadoras de pentoses, exigindo uma etapa de detoxificação. Após uma etapa de evaporação, foi obtido um rendimento de etanol de $83,6 \pm 1,0\%$ empregando a levedura industrial de 2G Celere2L, restando apenas 11,4% de açúcares C5 no meio após 8 h de fermentação. Já na fermentação do hidrolisado da fração sólida, não foram observados problemas na etapa de fermentação, sendo obtido rendimento de $81,9 \pm 0,3\%$ empregando a levedura industrial 1G Ethanol Red® em biorreator. Esses resultados demonstram que o bagaço das folhas de *Agave sisalana* é uma matéria-prima promissora para a produção de E2G com potencial de gerar até 183,3 L de

etanol/ton de bagaço na rota utilizando apenas a fração sólida, e 216,5 L de etanol/ton quando se considera a lama do pré-tratamento.

Palavras-chave: biocombustíveis; folha de sisal; etanol de segunda geração; hidrólise enzimática; *Agave sisalana*.

ABSTRACT

Agave sisalana, widely cultivated in Northeastern Brazil, holds significant socioeconomic importance, although its leaves are underutilized in sisal fiber production. As an alternative to add value to the production chain, its use in biofuel production has emerged as a promising and sustainable solution. In this context, the objective of this study was to evaluate the pretreatment of *Agave sisalana* leaf bagasse by varying time, temperature, solid loading, and acid concentration using a fractional factorial design. The effects of these variables were analyzed based on biomass fraction solubilization and polysaccharide conversion during the enzymatic hydrolysis step, which was carried out using both the slurry (solid + liquid fractions) and the washed solid fraction. Additionally, the impact of potential inhibitors formed during pretreatment on biotechnological processes was assessed, as well as the contribution of pentoses to the overall fermentation balance. Pretreatment experiments indicated that acid concentration and temperature were the most significant variables for cellulose and hemicellulose solubilization, respectively. In enzymatic hydrolysis, inhibitors formed during pretreatment did not significantly affect polysaccharide conversion. The best overall conversion results for washed solids were observed in experiment 4 (30 min, 200°C, 15% solids, no acid), with cellulose and hemicellulose conversion rates of $70.6 \pm 0.3\%$ and $2.3 \pm 0.1\%$, respectively. For enzymatic hydrolysis of the slurry, the best overall conversion results were observed in experiment 2 (30 min, 180°C, 15.0% solids, 0.5% acid), with $60.32 \pm 1.0\%$ cellulose and $80.32 \pm 0.2\%$ hemicellulose conversion. During fermentation, inhibitory effects from compounds present in the slurry hydrolysate were observed on pentose-fermenting yeasts, requiring a detoxification step. After an evaporation step, an ethanol yield of $83.6 \pm 1.0\%$ was achieved using the industrial 2G ethanol yeast Celere2L, leaving only 11.4% of C5 sugars in the medium after 8 h of fermentation. In contrast, fermentation of the washed solid hydrolysate did not present any issues, achieving an ethanol yield of $81.9 \pm 0.3\%$ using the industrial 1G ethanol yeast Ethanol Red® in a bioreactor. These results demonstrate that *Agave sisalana* leaf bagasse is a promising feedstock for second generation (2G) ethanol production, with the potential to yield up to 183.3 L of ethanol per ton of bagasse when using only the solid fraction, and 216.5 L per ton when including the pretreatment slurry.

Keywords: biofuels; sisal leaves; second-generation ethanol; enzymatic hydrolysis; *Agave sisalana*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cadeia de celulose.....	26
Figura 2 - Componentes das hemiceluloses	27
Figura 3 - Precursores primários das ligninas: álcool p-cumarílico (I), álcool coniferílico (II) e álcool sinapílico (III).....	27
Figura 4 - Efeitos do pré-tratamento em materiais lignocelulósicos	29
Figura 5 - Compostos formados durante o pré-tratamento de biomassa lignocelulósica	30
Figura 6 - Planta de <i>Agave sisalana</i>	38
Figura 7 - Distribuição territorial da produção de fibra de sisal no Brasil.....	39
Figura 8 - Processo produtivo de fibras de sisal e seus subprodutos	40
Figura 9 - Equipamento de raspagem da folha de agave para obtenção do sisal. (a) Equipamento durante processo de desfibramento e (b) Rotor de raspagem com protetor aberto	41
Figura 10 - Produtos e subprodutos do beneficiamento da <i>Agave sisalana</i> . (a) Fibra de sisal, (b) mucilagem, (c) bucha e (d) caldo	42
Figura 11 - Estrutura dos frutanos de agave. (a) Inulinas, (b) neoinulina, (c) levano, (d) neolevano, (e) graminano e (f) agavina	45
Figura 12 - Fluxograma das atividades do projeto	48
Figura 13 – Análise granulométrica da biomassa.....	58
Figura 14 - Solubilização de celulose, hemiceluloses e lignina no pré-tratamento....	64
Figura 15 – Diagramas de Pareto do planejamento de pré-tratamento para solubilização de celulose (a), hemiceluloses (b) e lignina (c)	65
Figura 16 - Cinética de hidrólise enzimática do ensaio 1 (30 min, 180°C, 10%, m/m sólidos e 0,0%, m/m ácido) a partir da fração sólida (a), da lama (ST) (b) e da lama (SI) (c).....	67
Figura 17 – Conversão de celulose após 72 h de hidrólise enzimática	68
Figura 18 – Rendimento global de celulose a partir da fração sólida de pré-tratamento	70
Figura 19 – Distribuição da massa de celulose após pré-tratamento e hidrólise da lama (ST) (a) e da lama (SI) (b)	72
Figura 20 – Diagramas de Pareto do rendimento global de celulose da fração sólida (a), da lama (ST) (b) e da lama (SI) (c).....	73

Figura 21 – Conversão de hemiceluloses após 72 h de hidrólise enzimática	75
Figura 22 – Rendimento global de hemiceluloses a partir da fração sólida de pré-tratamento	76
Figura 23 – Distribuição da massa de hemiceluloses após pré-tratamento e hidrólise da lama (ST) (a) e da lama (SI) (b)	78
Figura 24 – Diagramas de Pareto do rendimento global de hemiceluloses da fração sólida (a), da lama (ST) (b) e da lama (SI) (c).....	79
Figura 25 – Perfil de fermentação do hidrolisado da fração sólida de pré-tratamento com as leveduras Ethanol Red® (a), DistilaMax™ TQ (b) e SA -1 (c). Celobiose (—●—), glicose (—●—), xilose (—●—), ácido láctico (—●—), ácido fórmico (—●—), ácido acético (—●—), etanol (—●—), massa celular (—●—), xilitol (—●—), ácido succínico (—●—) e glicerol (—●—).....	82
Figura 26 – Perfil de fermentação do hidrolisado da fração sólida com levedura Ethanol Red® em biorreator	84
Figura 27 – Perfil de fermentação do hidrolisado da lama de pré-tratamento com levedura <i>Kluyveromyces marxianus</i> (a), <i>Spathaspora passalidarum</i> (b) e Celere2L (c): celobiose (—●—), glicose (—●—), xilose (—●—), arabinose (—●—), xilitol	86
Figura 28 – Perfis de fermentação do hidrolisado da lama de pré-tratamento detoxificada em um estágio (evaporação) (a, c, e) e dois estágios (evaporação + adsorção) (b, d, f). As fermentações foram realizadas com os três microrganismos: (a, b) <i>Kluyveromyces marxianus</i> , (c, d) <i>Spathaspora passalidarum</i> e (e, f) Celere2L. Celobiose (—●—), glicose (—●—), arabinose (—●—), xilitol (—●—), glicerol (—●—), ácido fórmico (—●—), ácido acético (—●—), etanol (—●—), massa celular (—●—) e xilose (—●—).....	89
Figura 29 – Balanço de massa para rota empregando a fração sólida de pré-tratamento	94
Figura 30 – Balanço de massa para a rota empregando a lama de pré-tratamento .	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Avaliação comparativa de diferentes espécies de agaves na produção de E2G	36
Tabela 2 - Composição química da biomassa de Agave sisalana	44
Tabela 3 - Planejamento inicial do pré-tratamento	50
Tabela 4 - Parâmetros cinéticos para avaliação da fermentação	56
Tabela 5 - Composição química da biomassa antes e após o processo de lavagem	59
Tabela 6 - Composição química da biomassa lavada e após os ensaios de pré-tratamento	61
Tabela 7 - Composição química do licor obtido após os ensaios de pré-tratamento	62
Tabela 8 - Composição química dos hidrolisados a serem fermentados	81
Tabela 9 – Parâmetros fermentativos do hidrolisado da fração sólida	83
Tabela 10 – Comparativo entre os parâmetros de fermentação do hidrolisado da fração sólida em biorreator e frascos agitados	85
Tabela 11 – Parâmetros de fermentação do hidrolisado da lama	87
Tabela 12 – Remoção dos inibidores considerando uma e duas etapas de detoxificação.....	88
Tabela 13 – Parâmetros de fermentação do hidrolisado da lama com uma etapa (a) e duas etapas (b) de detoxificação	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ART	Açúcares Redutores Totais
C5	Açúcares com 5 átomos de carbono
C6	Açúcares com 6 átomos de carbono
CAM	Metabolismo Ácido das Crassuláceas
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DNS	Ácido 3,5-dinitrosalicílico
E1G	Etanol de primeira geração
E2G	Etanol de segunda geração
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FSC	Fator de Severidade Combinada
HMF	5-hidroximetilfurfural
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OGM	Organismo Geneticamente Modificado
ONU	Organização das Nações Unidas
SHF	Hidrólise e fermentação separadas
SHCF	Hidrólise separada com co-fermentação
SI	Sólidos Insolúveis
ST	Sólidos Totais (insolúveis + solúveis)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1	Biocombustíveis	24
2.1.1	Etanol de Primeira (E1G) e Segunda (E2G) Geração.....	25
2.1.1.1	Etapas da produção de E2G	28
2.1.1.2	Produção de biocombustíveis a partir de agave	34
2.2	Agave.....	37
2.2.1	Agave sisalana.....	37
2.2.2	Produção de sisal no Brasil e aspectos econômicos	38
2.2.3	Bagaço das folhas de Agave sisalana	43
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1	Obtenção e preparo das folhas	47
3.2	Lavagem das folhas para extração de frutanos e saponinas	48
3.3	Avaliação das condições operacionais de pré-tratamento.....	50
3.4	Hidrólise enzimática das biomassas	52
3.5	Fermentação alcoólica	54
3.6	Detoxificação	56
3.7	Análises estatísticas dos dados.....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	Análise granulométrica da biomassa	58
4.2	Análise da composição química da biomassa.....	58
4.2	Avaliação do pré-tratamento	60
4.3	Efeito do pré-tratamento na hidrólise enzimática.....	66
4.3.1	Cinética de hidrólise enzimática	66
4.3.2	Conversão da celulose na hidrólise enzimática e balanço global	68
4.3.3	Conversão das hemiceluloses na hidrólise enzimática e balanço global	74
4.4	Fermentação alcoólica	80
4.4.1	Fermentação do hidrolisado da fração sólida	81
4.4.2	Fermentação do hidrolisado da lama	85
4.5	Balanço de massa nas melhores condições de processo.....	92

5	CONCLUSÕES.....	92
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A – Cinética da hidrólise enzimática.....	109
	APÊNDICE B – Análises estatísticas através do diagrama de Pareto .	114
	ANEXO A – Composição química da biomassa	116
	ANEXO B – Composição química de frações líquidas	122
	ANEXO C – Determinação da atividade enzimática	125

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas tendem a provocar significativa alteração na dinâmica atmosférica global, representando uma preocupação mundial que está integrada nos objetivos de desenvolvimento sustentáveis da Agenda 2030 (ONU, 2015). Essa situação impulsiona a busca por alternativas, como a migração da matriz energética para energias sustentáveis.

De acordo com Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética brasileira em 2023, contava com 49,1% de fontes renováveis de energia, uma matriz mais sustentável frente ao resto do mundo (14,7% e em 2021). Entretanto, quanto ao consumo de energia no país, a área de transportes, que possui a maior participação (33%), ainda é majoritariamente não renovável, contando com apenas 22,5% de biocombustíveis. Desse modo, o Brasil tem muito a crescer na sustentabilidade energética do transporte (EPE, 2024).

O etanol se destaca entre os biocombustíveis brasileiros, tendo a cana-de-açúcar como principal matéria-prima e o milho com participação crescente na produção deste biocombustível no país (EPE, 2024). No entanto, a problematização gerada pelas mudanças climática desperta a questão da vulnerabilidade de culturas como a da cana-de-açúcar no Brasil, não apenas pela redução de produtividade, mas também pela competitividade pela área cultivada e pelo uso da água (Brasil, 2021). Dessa forma, a identificação de novas fontes de biomassa para a geração de etanol torna-se extremamente relevante.

Nesse contexto, a *Agave sisalana* é uma alternativa promissora, uma vez que é uma planta altamente tolerante a ambientes áridos e semiáridos, e é a principal espécie de agave cultivada no Brasil, sendo produzida principalmente na região nordeste do país (Queiroga *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2015).

Popularmente conhecida como sisal, a *Agave sisalana* é muito empregada no aproveitamento das fibras presentes em suas folhas, sendo o Brasil o maior produtor e exportador mundial, com participação de 43,1% no total produzido, com produção estimada em 91,9 mil toneladas no ano de 2022 (Conab, 2024). Desse modo, a cultura da *Agave sisalana* no país é de extrema importância para o desenvolvimento da população rural no semiárido brasileiro, região em que não se encontram muitas

alternativas econômicas, sendo o sisal um indiscutível gerador de empregos e renda (Queiroga *et al.*, 2021; Santos; Silva, 2017).

Para a obtenção da fibra de sisal, as folhas da agave devem ser desfibradas e beneficiadas. Entretanto, esse processo leva a um rendimento de fibras de apenas 3 a 5%, sendo o restante denominado como resíduos do beneficiamento (Martin *et al.*, 2009; Queiroga *et al.*, 2021; Sousa, 2016). De acordo com dados do Conab (2024), a exportação das fibra de sisal pelo Brasil vêm diminuindo ao longo dos últimos anos, tanto em valor, com redução de 17,3%, quanto em volume, 19,5%, se comparado ao mesmo período do ano anterior, 2023. Isso se deve, principalmente, à redução da produtividade da agave e a influência da menor taxa de câmbio nos primeiros meses do ano e nos anos anteriores. Desse modo, é de grande relevância para o setor aumentar o aproveitamento da planta de sisal, visando agregar mais valor econômico a cadeia produtiva, uma vez que a cultura da *Agave sisalana* no país é de extrema importância para o desenvolvimento da população rural no semiárido brasileiro, região em que não se encontram muitas alternativas econômicas, sendo o sisal um indiscutível gerador de empregos e renda (QUEIROGA *et al.*, 2021).

Além disso, as folhas de *Agave sisalana* são compostas por um caldo rico em frutanos, saponinas, e uma fração lignocelulósica rica em celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e cinzas, tais frações podem ser empregadas na produção de etanol de primeira (E1G) e segunda geração (E2G), respectivamente, se tornando uma alternativa sustentável e viável para o desenvolvimento socioeconômico no semiárido do Brasil (Bardone *et al.*, 2018; Martins, 2018). Considerando tal cenário, empresas de biocombustível tem apresentado interesse na utilização de agave visando a produção de etanol, biogás e outros bioprodutos, entre elas se destaca a empresa Shell, que é investidora no Projeto *Brazilian Agave Development* (BRAVE) que visa desenvolver o plantio, o cultivo e a colheita da agave, além de tecnologias de processamento para produção biocombustíveis a partir da planta (ANP, 2023; Moióli, 2024).

Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a produção do E2G utilizando as folhas de *Agave sisalana* após a extração do caldo. Para isso, a etapa de pré-tratamento foi avaliada por meio de um planejamento fatorial fracionado 2^{4-1} , com triplicata no ponto central, tendo como variáveis o tempo (30, 45 e 60 min), a temperatura (180, 190 e 200°C), a concentração de sólidos (10, 12,5 e 15%, m/m) e a concentração de ácido no meio (0, 0,25 e 0,5%, m/m). Os materiais obtidos foram

caracterizados quanto a composição química (frações sólidas e líquidas), o rendimento de pré-tratamento de cada ensaio determinado e as solubilizações de cada fração determinada de acordo com a condição operacional. Os materiais foram então avaliados na etapa de hidrólise enzimática por meio de hidrólise direta da lama (fração sólida + líquida), além da hidrólise empregando apenas da fração sólida após um processo de lavagem para extração completa da fração líquida. A etapa de lavagem foi realizada visando avaliar a influência dos inibidores na etapa de hidrólise enzimática. As melhores condições de pré-tratamento, que proporcionaram a menor perda de açúcares fermentescíveis durante o processo e melhor recuperação dos açúcares durante a etapa de hidrólise enzimática tanto para a lama quanto para a fração sólida, foram avaliadas em uma etapa fermentativa, visando a produção de E2G.

5 CONCLUSÕES

A etapa de pré-tratamento hidrotérmico/ácido se mostrou eficiente na solubilização das hemiceluloses, levando a valores superiores a 75% e chegando até a 99,70% de solubilização (Fator de severidade combinada = 2,42). Foi observado que as altas temperaturas combinadas com a presença do ácido favoreceu a solubilização das hemiceluloses, entretanto, promoveu uma maior formação de produtos de degradação. A presença do ácido sulfúrico no pré-tratamento também influenciou na solubilização da celulose, promovendo uma solubilização de até 58,01% na condição mais severa do processo (Fator de severidade combinada = 2,42), proporcionando também perdas de açúcares e formação de produtos de degradação.

Desse modo, a análise estatística indicou realizar a etapa de pré-tratamento em menor tempo, temperatura e principalmente ácido, podem promover uma melhor preservação da celulose e menor formação de produtos de degradação após a solubilização de hemiceluloses.

Em relação aos produtos de degradação gerados no processo, aparentemente eles não apresentaram caráter inibitório na etapa hidrólise enzimática, uma vez que, mesmo em condições com elevada concentração de produtos de degradação, como nos ensaios 3 (30 min, 200°C, 10% sólidos e 0,5% ácido), 5 (60 min, 180°C, 10% sólidos e 0,5% ácido) e 8 (60 min, 200°C, 15% sólidos e 0,5% ácido), a conversão da celulose na hidrólise se mostrou elevada, $99,5 \pm 1,8\%$, $95,9 \pm 0,9\%$ e $93,4 \pm 1,2\%$, respectivamente.

Os melhores resultados de rendimento global de conversão de celulose e hemiceluloses, utilizando apenas a fração sólida de pré-tratamento, foi obtido no ensaio 4 (30 min, 200°C, 15,0% sólidos, sem ácido), que apresentou conversões globais de celulose e hemiceluloses de $70,6 \pm 0,3\%$ e $2,3 \pm 0,1\%$, respectivamente. Enquanto para os ensaios realizados com hidrólise direta da lama de pré-tratamento, o ensaio 2 (30 min, 180°C, 15,0% sólidos, 05% ácido) resultou nas maiores conversões globais de celulose e hemiceluloses, $60,32 \pm 1,0\%$ e $80,32 \pm 0,2\%$, respectivamente.

Na etapa de fermentação, os produtos de degradação, presentes na lama de pré-tratamento, apresentaram caráter inibitório as leveduras fermentadoras de pentoses avaliadas, sendo necessária uma etapa de detoxificação do hidrolisado para um bom desempenho de fermentação. Após uma etapa de detoxificação, a fermentação do

hidrolisado da lama do pré-tratamento 2 (30 min, 180 °C, 15,0% de sólidos e 0,5% de ácido), alcançou rendimento de $83,59 \pm 1,00\%$ utilizando levedura Celere2L após 8 h de fermentação, sendo que uma segunda etapa de detoxificação, para a remoção de compostos fenólicos, promoveu uma melhoria apenas da produtividade fermentativa.

Por outro lado, a fermentação do hidrolisado da fração sólida obtida no pré-tratamento 4 (30 min, 200 °C, 15,0% de sólidos, sem ácido), empregando levedura Ethanol Red®, foi eficiente, atingindo rendimento de $81,85 \pm 0,27\%$.

Esses resultados demonstram que o bagaço das folhas de *Agave sisalana* é uma matéria-prima promissora para a produção de E2G. A rota que utiliza apenas a fração sólida apresenta potencial de gerar até 183,3 L de etanol/ton de bagaço, com o licor de pré-tratamento passível de aproveitamento para outros fins. Já a rota que considera a lama do pré-tratamento pode alcançar 216,5 L de etanol/ton, reforçando o valor do *Agave* como biomassa alternativa em regiões áridas.

REFERÊNCIAS

- ADITIYA, H. B. *et al.* Second generation bioethanol production: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 631–653, 2016.
- ADNEY, B; BAKER, J. Measurement of Cellulase Activities: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date: 08/12/1996. 1996. Disponível em: www.nrel.gov. Acesso em: 21 ago. 2023.
- AGUIRRE-FIERRO, Areli *et al.* Sustainable approach of high-pressure agave bagasse pretreatment for ethanol production. **Renewable Energy**, v. 155, p. 1347–1354, 2020.
- ALLSOPP, Philip *et al.* An exploratory study into the putative prebiotic activity of fructans isolated from Agave angustifolia and the associated anticancer activity. **Anaerobe**, v. 22, p. 38–44, 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23714623/>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- ÁLVAREZ-CHÁVEZ, Jimena *et al.* Agave By-Products: An Overview of Their Nutraceutical Value, Current Applications, and Processing Methods. **Polysaccharides**, v. 2, n. 3, p. 720–743, 2021.
- ALVES, Maria Odete; SANTIAGO, Eduardo Girão; LIMA, Antônio Renan Moreira. **Documentos do ETENE: Diagnóstico socioeconômico do setor sisaleiro do Nordeste brasileiro**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil S.A., 2005. v. 4. Disponível em: s1dspp01.dmz.bnb:8443/s482-dspace/handle/123456789/188. Acesso em: 30 ago. 2023.
- ANP. **Cláusula de PD&I: ANP participa de lançamento de projeto que usa agave para produção de biomassa**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/clausula-de-pd-i-anp-participa-de-lancamento-de-projeto-que-usa-agave-para-producao-de-biomassa. Acesso em: 20 nov. 2024.
- ANP. **Resolução 907 2022 da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis BR**. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-907-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-etanol-combustivel-e-suas-regras-de-comercializacao-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- APOLINÁRIO, Alexsandra Conceição *et al.* Extraction, isolation and characterization of inulin from Agave sisalana boles. **Industrial Crops and Products**, v. 108, p. 355–362, 2017.
- APOLINÁRIO, Alexsandra Conceição. **OBTENÇÃO DE PRODUTOS DE INTERESSE FARMACÊUTICO A PARTIR DO Agave sisalana PERRINE ex ENGELM.: UMA PROPOSTA DE REVITALIZAÇÃO DA CULTURA SISALEIRA NA PARAÍBA**. 2014. 1–164 f. - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande / PB, 2014.
- ARAUJO, Michelle Fernandes. **Integração dos processos de produção de etanol de segunda geração e biodiesel**. 2021. 1–99 f. - Universidade Estadual de

Campinas, Campinas - SP, 2021.

ASSAD, Eduardo Delgado *et al.* Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado. *In: DINÂMICA AGRÍCOLA NO CERRADO: ANÁLISES E PROJEÇÕES*. Embrapa, Sed. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 213–227.

BARDONE, Enrico *et al.* Hydrothermal Treatment Of Sisal Bagasse. v. 64, 2018. Disponível em: www.aidic.it/cet. Acesso em: 17 nov. 2022.

BORLAND, Anne M. *et al.* Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2879–2896, 2009. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1093/jxb/erp118>. Acesso em: 6 ago. 2023.

BRASIL. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília - DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica., 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/comunicacoes-nacionais-do-brasil>. Acesso em: 15 ago. 2024.

BRENELLI, Livia B. *et al.* An integrated approach to obtain xylo-oligosaccharides from sugarcane straw: From lab to pilot scale. **Bioresource Technology**, v. 313, p. 123637, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420309093>.

CARRANZA, Clarita Olvera *et al.* Processing of Fructans and Oligosaccharides from Agave Plants. **Processing and Impact on Active Components in Food**, p. 121–129, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283891609_Processing_of_Fructans_and_Oligosaccharides_from_Agave_Plants. Acesso em: 30 ago. 2023.

CHAMPREDA, Verawat *et al.* Designing cellulolytic enzyme systems for biorefinery: From nature to application. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 128, n. 6, p. 637–654, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389172319301884>. Acesso em: 25 jun. 2025.

CLEMENTE, João Vitor Fernandes. **Mucilagem de sisal (Agave sisalana, Perrine) ensilada para alimentação de caprinos e ovinos**. 2021. 115 f. - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2021.

CONAB. **Sisal: Análise mensal - Abril de 2024**. Brasília: [s. n.], 2024.

CONAB. **Sisal: Análise mensal - Março de 2025**. Brasília, DF: Conab - Companhia Nacional de Abastecimento, 2025.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. **Companhia Nacional de Abastecimento**, v. 1, n. 1, p. 1–53, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 22 jul. 2024.

CRUZ, Delcy Mac. **Agave se junta à cana e ao milho como matéria-prima de produção de etanol**. 2023. Disponível em: <https://www.fenasucro.com.br/pt-br/blog/bioenergia/agave-se-junta-a-cana-e-ao-milho-como-materia-prima-de>

producao-.html. Acesso em: 31 ago. 2023.

DAVIS, Sarah C.; DOHLEMAN, Frank G.; LONG, Stephen P. The global potential for Agave as a biofuel feedstock. **GCB Bioenergy**, v. 3, n. 1, p. 68–78, 2011.

DIAS RIBEIRO, Bernardo. **Estratégias de Processamento Verde de Saponinas da Biodiversidade Brasileira**. 2012. 1–187 f. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

DÍAZ-BLANCO, Deniss I. *et al.* Optimization of dilute acid pretreatment of Agave lechuguilla and ethanol production by co-fermentation with *Escherichia coli* MM160. **Industrial Crops and Products**, v. 114, p. 154–163, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669018300876>. Acesso em: 3 mar. 2024.

DIONÍSIO, S. R. *et al.* Second-generation ethanol process for integral use of hemicellulosic and cellulosic hydrolysates from diluted sulfuric acid pretreatment of sugarcane bagasse. **Fuel**, v. 304, p. 121290, 2021.

DUNCAN, James D.; SETATI, Mathabatha E.; DIVOL, Benoit. Redox cofactor metabolism in *Saccharomyces cerevisiae* and its impact on the production of alcoholic fermentation end-products. **Food Research International**, v. 163, p. 112276, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996922013345>. Acesso em: 8 jul. 2025.

DURÁN, Alexandra G. *et al.* Agave steroidal saponins as potential bioherbicides. **Agronomy**, v. 11, n. 12, 2021.

EPE. **Balanco Energético Nacional, Relatório Síntese 2024: Ano Base 2023**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_Síntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2024: Ano base 2023**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2024.

EPE. **Mudanças climáticas e Transição energética**. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia>. Acesso em: 20 jul. 2024.

FAO. **Jute, kenaf, sisal, abaca, coir and allied fibres: Statistical bulletin 2022**. Rome: [s. n.], 2023.

FLACK-PRAIN, Sophie *et al.* The impact of climate change and climate extremes on sugarcane production. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 3, p. 408–424, 2021. Disponível em: [/busca-de-noticias/-/noticia/60098855/mudancas-e-extremos-climaticos-impactam-a-producao-de-cana-de-acucar](#). Acesso em: 15 ago. 2024.

GALVÃO, Viviane Moreira Lima. **Distribuição da heterocromatina em acessos do gênero Agave L.** 2017. 1–47 f. - Universidade Rural de Pernambuco, Recife - PE, 2017.

GEBRETSADIK, Tesfamariam Teklu *et al.* Characterization and Comparative Insights on Agave Americana and Agave Sisalana Leaf Fibers for High-Performance

Applications. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, n. 2, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15440478.2023.2246648#d1e263>. Acesso em: 24 out. 2024.

GHOSE, T. K. Measurement of cellulase activities. **Pure and Applied Chemistry**, v. 59, n. 2, p. 257–268, 1987. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/pac198759020257/html>. Acesso em: 21 ago. 2023.

GONZÁLEZ-ÁLVAREZ, M. *et al.* In vitro evaluation of antifungal activity of Agave (Agave scabra, Salm Dyck) extracts against post-harvest mushrooms. **Phyton-International Journal of Experimental Botany**, v. 84, n. 2, p. 427–434, 2015. Disponível em: <https://www.techscience.com/phyton/v84n2/37176>. Acesso em: 22 nov. 2024.

GUO, Hongliang *et al.* Enzymes and enzymatic mechanisms in enzymatic degradation of lignocellulosic biomass: A mini-review. **Bioresource Technology**, v. 367, p. 128252, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852422015851?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 25 jun. 2025.

HAGHIGHI MOOD, Sohrab *et al.* Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 77–93, 2013.

HAMES, B *et al.* **Preparation of Samples for Compositional Analysis: Laboratory Analytical Procedure (LAP)** National Renewable Energy Laboratory (NREL). [S. l.: s. n.], 2005.

HASUNUMA, Tomohisa *et al.* Metabolic pathway engineering based on metabolomics confers acetic and formic acid tolerance to a recombinant xylose-fermenting strain of *Saccharomyces cerevisiae*. **Microbial Cell Factories**, v. 10, n. 1, p. 1–13, 2011. Disponível em: <https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/1475-2859-10-2>. Acesso em: 9 jul. 2025.

HENDRY, George A. F.; WALLACE, Rebecca K. The origin, distribution, and evolutionary significance of fructans. In: SUZUKI, Michio; CHATTERTON, N. Jerry (org.). **Science and technology of fructans**. Boca Raton: CRC Press, 1993. p. 119–139.

HOANG, Anh Tuan *et al.* Acid-based lignocellulosic biomass biorefinery for bioenergy production: Advantages, application constraints, and perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113194, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721012561>. Acesso em: 22 jul. 2024.

IBGE. **Produção de Sisal (fibra) no Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/sisal-fibra/br>. Acesso em: 20 nov. 2024.

INPE. **Monitoramento do território: Mudanças climáticas**. 2024. Disponível em: <http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LÁINEZ, Magdiel *et al.* Bioethanol production from enzymatic hydrolysates of Agave salmiana leaves comparing *S. cerevisiae* and *K. marxianus*. **Renewable Energy**, v. 138, p. 1127–1133, 2019.

LI, Hongjia *et al.* Chemical composition and characterization of cellulose for Agave as a fast-growing, drought-tolerant biofuels feedstock. **RSC Advances**, v. 2, n. 11, p. 4951–4958, 2012.

LIMA, Clebson Sidney Sabino. **CARACTERIZAÇÃO DA COMPOSIÇÃO LIGNOCELULÓSICA DO SISAL (Agave sisalana) PARA PRODUÇÃO DE ETANOL**. 2013. 1–47 f. - Universidade Federal de Campina Grande, Cuité - PB, 2013.

LIMA, Clebson S.S. *et al.* Characterization of acid hydrolysis of sisal. **Applied Energy**, v. 102, p. 254–259, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261912007027>. Acesso em: 17 nov. 2022.

LÓPEZ-ROMERO, Julio Cesar *et al.* Antioxidant and antimicrobial activity of Agave angustifolia extract on overall quality and shelf life of pork patties stored under refrigeration. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 11, p. 4413–4423, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-018-3351-3>. Acesso em: 22 nov. 2024.

LÓPEZ-ROMERO, Julio Cesar *et al.* Biological activities of Agave by-products and their possible applications in food and pharmaceuticals. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 7, p. 2461–2474, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jsfa.8738>. Acesso em: 28 jul. 2023.

MALIK, Kamran *et al.* Lignocellulosic biomass for bioethanol: Insight into the advanced pretreatment and fermentation approaches. **Industrial Crops and Products**, v. 188, 2022.

MANKAR, Akshay R. *et al.* Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. **Bioresource technology**, v. 334, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33957458/>. Acesso em: 30 ago. 2023.

MARABEZI, Karen. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar**. 2009. 1–158 f. - Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75131/tde-07102009-100309/>. Acesso em: 5 ago. 2023.

MARCEL MOSHI, Arul *et al.* Characterization of New Natural Cellulosic Fibers-A Comprehensive Review. *In*: , 2019. **International Conference on Materials Engineering and Characterization**. [S. l.: s. n.], 2019.

MARTIN, Adriana R. *et al.* Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. **Polímeros**, v. 19, n. 1, p. 40–46, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/po/a/KpHS7DJFTwXzZWdTzXdSQRz/?lang=pt>. Acesso em: 17 abr. 2023.

MARTINS, Camila Zanetoni. **AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**. 2018. 1–50 f. - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2018.

MARTON, J. M. *et al.* Evaluation of the activated charcoals and adsorption conditions used in the treatment of sugarcane bagasse hydrolysate for xylitol production. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 23, n. 1, p. 9–21, 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/bjce/a/pMxPkgmHZFrW564LcCKYvxw/?lang=en&utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 26 jun. 2025.

MATEUS, Felipe. O futuro da energia está no agave?. **Jornal da Unicamp**, Campinas - SP, v. 680, 2022. Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/index.php/ju/680/o-futuro-da-energia-esta-no-agave>. Acesso em: 31 ago. 2023.

MCDUGALL, G. J. *et al.* Plant fibres: Botany, chemistry and processing for industrial use. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 62, n. 1, p. 1–20, 1993. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jsfa.2740620102>. Acesso em: 12 jun. 2023.

MCTI. **Emissões de GEE por Setor**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/emissoes-de-gee-por-setor-1>. Acesso em: 22 nov. 2024.

MILLER, Gail Lorenz. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426–428, 1959. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60147a030>. Acesso em: 21 ago. 2023.

MOIÓLI, Julia. **Levedura geneticamente modificada permite converter agave em etanol**. 2024. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/levedura-geneticamente-modificada-permite-converter-agave-etanol-170724>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MONTERROSAS-BRISSON, Nayeli *et al.* Anti-Inflammatory Activity of Different Agave Plants and the Compound Cantalasaponin-1. **Molecules** **2013**, Vol. **18**, Pages **8136-8146**, v. 18, n. 7, p. 8136–8146, 2013. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/18/7/8136/htm>. Acesso em: 22 nov. 2024.

NAKASU, P. Y.S. *et al.* Acid post-hydrolysis of xylooligosaccharides from hydrothermal pretreatment for pentose ethanol production. **Fuel**, v. 185, p. 73–84, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611630672X?via%3Dihub>. Acesso em: 2 dez. 2024.

NAKASU, Pedro Yoritomo Souza. **CINÉTICA DA HIDRÓLISE ÁCIDA DO LICOR OBTIDO APÓS PRÉ-TRATAMENTO HIDROTÉRMICO**. 2015. 1–176 f. - Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2015.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 20 jul. 2024.

PALMQVIST, Eva; HAHN-HÄGERDAL, Bärbel. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 1, p. 25–33, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852499001613>. Acesso em: 9 jul. 2025.

PATEL, Amisha; SHAH, Amita R. Integrated lignocellulosic biorefinery: Gateway for production of second generation ethanol and value added products. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 6, n. 2, p. 108–128, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2369969821000074>. Acesso em: 22 jul. 2024.

PÉREZ-LÓPEZ, Arely V.; SIMPSON, June. The Sweet Taste of Adapting to the Desert: Fructan Metabolism in Agave Species. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2020.00324/full>. Acesso em: 20 nov. 2024.

QUEIROGA, Vicente de Paula *et al.* **SISAL (Agave sisalana, Perrine) TECNOLOGIAS DE PLANTIO E UTILIZAÇÃO**. 1ª edição. Campina Grande: Associação da Revista Eletrônica a Barriguda - AREPB, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/351229045>.

RABELO, Sarita Cândida *et al.* Enhancement of the enzymatic digestibility of sugarcane bagasse by steam pretreatment impregnated with hydrogen peroxide. **Biotechnology progress**, v. 28, n. 5, p. 1207–1217, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22753357/>. Acesso em: 28 out. 2024.

RABELO, Sarita Cândida *et al.* Pretreatments as a key for enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass. **Polysaccharide Degrading Biocatalysts**, p. 109–137, 2023.

RAVAGNANI, M. A.S.S. *et al.* Anhydrous ethanol production by extractive distillation: A solvent case study. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 88, n. 1, p. 67–73, 2010.

RFA. **Produção Anual de Etanol**. 2024. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 22 jul. 2024.

RIBEIRO, Bernardo Dias; COELHO, Maria Alice Zarur; MARRUCHO, Isabel M. Extraction of saponins from sisal (*Agave sisalana*) and juá (*Ziziphus joazeiro*) with cholinium-based ionic liquids and deep eutectic solvents. **European Food Research and Technology**, v. 237, n. 6, p. 965–975, 2013.

RIJAL, Deepa *et al.* Process options for conversion of Agave tequilana leaves into bioethanol. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 263–272, 2016.

RIOS-GONZÁLEZ, Leopoldo J. *et al.* Autohydrolysis pretreatment assessment in ethanol production from agave bagasse. **Bioresource Technology**, v. 242, p. 184–190, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417303097>. Acesso em: 3 mar. 2024.

ROQUE, Laerti Reis *et al.* Liquid-liquid extraction: A promising alternative for inhibitors removing of pentoses fermentation. **Fuel**, v. 242, p. 775–787, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118321987?via%3Dihub>. Acesso em: 6 maio 2025.

SANTIAGO-GÓMEZ, Moisés; HERNÁNDEZ-MENDOZA, Alonso G.; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Sergio. Ethanol production from Agave salmiana leaves by semi and simultaneous saccharification and fermentation at high temperature using Kluyveromyces marxianus. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 50, p. 102703, 2023.

SANTOS, Jener David Gonçalves dos. **AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ANTIMICROBIANA DE EXTRATOS E CARACTERIZAÇÃO PARCIAL DE SAPONINAS OBTIDAS DO RESÍDUO DE Agave sisalana Perrine (SISAL)**. 2009. 1–125 f. - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana - BA, 2009.

SANTOS, Herikleno Silva. **EXTRAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE FRUTANOS EM Agave sisalana PERRINE**. 2016. 1–49 f. - Universidade Federal de Campina Grande, Cuité - PB, 2016.

SANTOS, Edinusia Moreira Carneiro; SILVA, Onildo Araujo da. SISAL IN BAHIA - BRAZIL. **Mercator**, v. 16, n. 12, p. 1–13, 2017.

SHELL. **Pesquisa & Desenvolvimento: Shell Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.shell.com.br/energia-e-inovacao/pesquisa-e-desenvolvimento.html>. Acesso em: 22 nov. 2024.

SILVA, Odilon Reny Ribeiro Ferreira da *et al.* Cultivo do Sisal no Nordeste Brasileiro. **Circular Técnica 123 - Embrapa**, 2008.

SILVA, Pedro Henrique Pinto. **Processo de produção de bioetanol de segunda geração a partir de resíduos da agroindústria da banana**. Niterói - RJ: [s. n.], 2022.

SILVA, Eudes Fernandes. **Produção de Etanol Segunda Geração (E2G) em biorreatores a partir da biomassa do sorgo sacarino (Sorghum bicolor [L.] Moench): uma revisão bibliográfica**. 2022. 1–54 f. - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, 2022.

SILVA, Odilon Reny Ribeiro Ferreira da *et al.* **Sisal com Tecnologia Embrapa para a Geração de Emprego e Renda na Agricultura Familiar do Nordeste**. Campina Grande - PB: [s. n.], 2011. Disponível em: www.cnpa.embrapa.br. .

SILVA, Odilon Reny Ribeiro Ferreira. **Sistemas diferenciados de cultivo: Sisal**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal/producao/sistema-diferenciados-de-cultivo>. Acesso em: 1 jul. 2024.

SILVA FILHO, Jean Antonio Aderaldo. **Obtenção de um extrato rico em saponinas a partir do resíduo industrial de Agave sisalana para aplicação na indústria cosmética**. 2022. 1–24 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2022.

SINGH, Anusuiya *et al.* Role of hydrothermal pretreatment towards sustainable biorefinery. **Bioresource Technology**, v. 367, p. 128271, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852422016042?casa_token=DkFaq_c5GIUAAAAA:2DfalrwD8UMk8RshVz7pkJGUK6UnF5_iiVXW-94EHKrwR5vV1r33MrbBxO7NBt88YEnJezA73znK. Acesso em: 23 nov. 2024.

SLUITER, A *et al.* **Determination of Sugars, Byproducts, and Degradation Products in Liquid Fraction Process Samples: Laboratory Analytical Procedure (LAP)** National Renewable Energy Laboratory (NREL). Colorado: [s. n.], 2008. Disponível em: <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/determination-of-sugars-byproducts-and-degradation-products-in-li>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SLUITER, Justin B. *et al.* Evaluation of Brazilian sugarcane bagasse characterization: An interlaboratory comparison study. **Journal of AOAC International**, v. 99, n. 3, p. 579–585, 2016.

SOUSA, Máiron Barreto. **Coprodutos do desfibramento do sisal na produção de silagem**. 2016. 1–44 f. - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas - BA, 2016.

SUINAGA, Fabio Akiyoshi; COUTINHO, Wirton Macedo; SILVA, Odilon Reny Ribeiro Ferreira da. **Sisal: Pós-colheita**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal/producao/pos-colheita>. Acesso em: 30 ago. 2023.

SUZUKI, Michio. History of fructan research: Rose to Edelman. *In*: SUZUKI, Michio; CHATTERTON, N. Jerry (org.). **Science and technology of fructans**. Boca Raton: CRC Press, 1993. p. 21–39.

TREJO-TORRES, Jorge C.; GANN, George D.; CHRISTENHUSZ, Maarten J.M. The Yucatan Peninsula is the place of origin of sisal (*Agave sisalana*, Asparagaceae): historical accounts, phytogeography and current populations. **Botanical Sciences**, v. 96, n. 2, p. 366–379, 2018. Disponível em: <https://www.botanicalsciences.com.mx/index.php/botanicalSciences/article/view/1928>. Acesso em: 28 jul. 2023.

URIBE, Janet Alejandra Gutiérrez; SANTOS-ZEA, Liliana; SALDÍVAR, Sergio Roman Othon Serna. **Agave syrup extract having anticancer activity**. Concessão: 25 mar. 2013.

VIDAL, Maria de Fátima. **Caderno Setorial ETENE: Etanol**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/etene/article/view/2711/1836>. Acesso em: 22 jul. 2024.

WOOD, Thomas M.; BHAT, K. Mahalingeshwara. Methods for measuring cellulase activities. **Methods in Enzymology**, v. 160, n. C, p. 87–112, 1988.

XIE, Hong Hui *et al.* Antifungal effects of sisal leaf juice on *Lasiodiplodia theobromae*, the causal agent of mulberry root rot. **African Journal of Biotechnology**, v. 15, n. 6, p. 165–171, 2016. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-abstract/5599D0257212>. Acesso em: 22 nov. 2024.

YANG, Lisha *et al.* Biomass characterization of *Agave* and *Opuntia* as potential

biofuel feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 76, p. 43–53, 2015.

YOUSUF, Abu; PIROZZI, Domenico; SANNINO, Filomena. **Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=2k-_DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=71mitzBIC1&sig=N8663jZ-da3Oru_1Hc_8jmy7SH0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 16 jul. 2024.

ZART, Paola Vanessa Miranda *et al.* ETANOL 1,5G: UMA DISCUSSÃO SOBRE A INTEGRAÇÃO ENTRE O ETANOL DE PRIMEIRA E SEGUNDA GERAÇÃO. *In:* , 2020, Evento Virtual. (Ísis Barbosa, Org.) **Congresso Internacional da Agroindústria - CIAGRO**. Evento Virtual: Ciência, tecnologia e Inovação: do campo à mesa, 2020. p. 1–19. Disponível em: www.institutoidv.orgfone:+558141020277. Acesso em: 6 ago. 2023.

ZHAO, Lei *et al.* Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: Challenges and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 343, p. 126123, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421014656?casa_token=n5XPsR8b0AcAAAAA:niTSevSrYzShiH1u7TPCJ4a9lrFSwEDB16i3Q4QDpDXDgZzs pBoqUobGAefzDvs7nDUmq77YpHn0. Acesso em: 23 nov. 2024.

ZULLO, Jurandir; PEREIRA, Vânia Rosa; KOGA-VICENTE, Andrea. Sugar-energy sector vulnerability under CMIP5 projections in the Brazilian central-southern macro-region. **Climatic Change**, v. 149, n. 3–4, p. 489–502, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-018-2249-4>. Acesso em: 15 ago. 2024.