

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de
05/09/2026

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until
September 5, 2026

NATHALIA SOARES BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÉIS A PARTIR DA CELULOSE DE
FOLHAS DE *Agave sisalana***

Botucatu

2025

NATHALIA SOARES BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÉIS A PARTIR DA CELULOSE 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.

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Sarita Cândida
Rabelo

Coorientador(a): Prof.^a Dr.^a Carla dos Santos
Riccardi

Botucatu

2025

B238a	Barbosa, Nathalia Soares Avaliação da produção de hidrogéis a partir da celulose de folhas de Agave sisalana / Nathalia Soares Barbosa. -- Botucatu, 2025 127 p. : il., tabs., fotos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientadora: Sarita Cândida Rabelo Coorientadora: Carla dos Santos Riccardi 1. Biorrefinaria. 2. Economia circular. 3. Biomassa lignocelulósica. 4. Material absorvente. 5. Polímero natural. I. Título.
-------	---

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

AValiação da produção de hidrogéis a partir da celulose de folhas de Agave sisalana

AUTORA: NATHÁLIA SOARES BARBOSA

ORIENTADORA: SARITA CÂNDIDA RABELO

COORIENTADORA: CARLA DOS SANTOS RICCARDI

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



Professora Doutora SARITA CÂNDIDA RABELO (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu Unesp



Prof. Dr. EMMANUEL DAMILANO DUTRA (Participação Virtual)
Energia Nuclear / Universidade Federal de Pernambuco



Prof.^a Dr.^a KARINE CAPPUCCIO DE CASTRO MAGALHÃES (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - Unesp

Botucatu, 05 de setembro de 2025.

*À minha mãe, a base e inspiração da minha vida.
Ao meu pai, fundamental na construção dos meus sonhos.
Ao meu irmão, melhor amigo e cúmplice nesta aventura que é viver.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida, que, em cada detalhe, me presenteou com uma existência incrível e abençoada, pela qual sou imensamente grata.

À minha família, tão grande e sempre amorosa, que me ensinou a humildade, a ser forte nas adversidades, a ser leal, íntegra, resiliente, a ter fé, a ser grata e a compreender que a vida vale a pena e deve ser vivida intensamente.

À orientação impecável da Profa. Dra. Sarita Cândida Rabelo e da Profa. Dra. Carla dos Santos Riccardi, às quais tenho gratidão por toda a dedicação, presença e ensinamentos compartilhados comigo. Levarei vocês como exemplos, mulheres pelas quais tenho grande admiração e honra.

Às minhas companheiras Estela e Ingrid, parceiras de muitas histórias, desde a faculdade até o mestrado. Que sigamos unidas para compartilhar outras fases de nossas vidas, por muitos e muitos anos.

Aos amigos incríveis que encontrei na escola, no cursinho, na graduação e no mestrado; as tantas aventuras que vivemos foram fundamentais para o que sou hoje. Carrego cada um de vocês no meu coração com carinho, saudade e orgulho de quem nos tornamos. Eu faria tudo de novo.

Aos colegas do Laboratório de Bioenergia e Produtos Renováveis, com os quais construímos juntos um ambiente colaborativo, unido e de empatia, resultando em uma convivência que tornava os dias mais divertidos e enriquecedores. Aos colegas que atuaram diretamente na minha pesquisa, Luiz e Ingrid, sou imensamente grata por compartilharem essa missão comigo; esse sucesso também é de vocês.

Aos profissionais de suporte acadêmico e demais colegas do LACEM, sempre muito prestativos e essenciais para o desenvolvimento das atividades de forma adequada. Além disso, agradeço pelos momentos divertidos e pelas conversas enriquecedoras, tanto no âmbito pessoal quanto profissional.

Enfim, à todas as pessoas que, direta ou indiretamente, estiveram comigo, torcendo por mim e sendo fator de soma, agradeço verdadeiramente.

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

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana”

Carl Gustav Jung

RESUMO

No Brasil, o uso do *Agave sisalana* Perrine permanece predominantemente voltado para a extração de sua fibra (sisal), reconhecida pela elevada resistência mecânica. Contudo, o crescente interesse por fontes renováveis e sustentáveis tem impulsionado estudos voltados à valorização integral dessa biomassa. Neste contexto, este trabalho avaliou a viabilidade de produção de hidrogéis superabsorventes a partir da celulose extraída das folhas do *Agave sisalana*. As folhas foram inicialmente prensadas para extração do caldo, e o bagaço obtido foi lavado e passou por pré-tratamento alcalino empregando uma solução de hidróxido de 10% (m/m), a 60°C por 4 h, à 10% (m/m) de sólidos. Em seguida, foi realizada uma etapa de branqueamento com peróxido de hidrogênio alcalino (24% (v/v) de peróxido de hidrogênio e 4% (m/m) de hidróxido de sódio) a 70°C por 40 min. A polpa obtida foi refinada, por via úmida, em 10 ciclos de 1 h, gerando microfibrilas de celulose. Essa celulose desfibrada foi empregada na formulação dos hidrogéis, segundo planejamento experimental 2³, com três repetições no ponto central, variando as concentrações de poli(álcool vinílico) - PVA (3 - 10% m/m), da celulose desfibrada (0,2 - 1% m/m) e da epicloridrina - ECH (3 - 10% m/m). O fracionamento mostrou-se eficiente, com solubilização de 90,7 ± 2,7% das hemiceluloses e 90,6 ± 4,6% da lignina, preservando 92,3 ± 3,1% da celulose. Nos hidrogéis, os ensaios no ponto central (6,5% de PVA, 6,5% de ECH e 0,6% celulose) apresentaram os melhores resultados, com rendimento de 82,91 ± 1,98%, grau de intumescimento em água de 518,34 ± 3,16%, e elevada integridade estrutural, refletindo em fração gel de 89,32 ± 0,26%. A análise estatística revelou que a celulose exerceu uma influência positiva e significativa no rendimento, enquanto o intumescimento foi favorecido pela interação entre PVA e ECH. Já a fração gel foi significativamente impactada pelo PVA. Comparada a celulose padrão, a celulose obtida da polpa branqueada apresentou desempenho estatisticamente superior em todas as variáveis resposta, evidenciando sua eficiência na formação de hidrogéis. Assim, os resultados apontaram o potencial do bagaço da folha de *Agave sisalana* como alternativa viável e promissora para o desenvolvimento de hidrogéis absorventes sustentáveis, com potencial de aplicação na agricultura.

Palavras-chave: biorrefinaria; economia circular; biomassa lignocelulósica; polímero natural; material absorvente.

ABSTRACT

In Brazil, the use of *Agave sisalana* Perrine remains predominantly focused on the extraction of its fiber (sisal), known for its high mechanical strength. However, the growing interest in renewable and sustainable sources has driven studies aimed at the integral valorization of this biomass. In this context, the present work evaluated the feasibility of producing superabsorbent hydrogels from cellulose extracted from *Agave sisalana* leaves. The leaves were first pressed to extract the juice, and the resulting bagasse was washed and subjected to an alkaline pretreatment using a 10% (w/w) sodium hydroxide solution at 60°C for 4 h, with 10% (w/w) solids content. Subsequently, an alkaline hydrogen peroxide bleaching step was carried out (24% v/v hydrogen peroxide and 4% w/w sodium hydroxide) at 70°C for 40 min. The obtained pulp was refined by wet processing in 10 cycles of 1 h, producing cellulose microfibrils. This defibrillated cellulose was then employed in the hydrogel formulations, according to a 2^3 experimental design with three replicates at the central point, varying the concentrations of poly(vinyl alcohol) – PVA (3–10% w/w), defibrillated cellulose (0.2–1% w/w), and epichlorohydrin – ECH (3–10% w/w). The fractionation process proved efficient, with solubilization of $90.7 \pm 2.7\%$ of hemicelluloses and $90.6 \pm 4.6\%$ of lignin, while preserving $92.3 \pm 3.1\%$ of cellulose. For the hydrogels, the assays at the central point (6.5% PVA, 6.5% ECH, and 0.6% cellulose) achieved the best results, with a synthesis yield of $82.91 \pm 1.98\%$, water swelling ratio of $518.34 \pm 3.16\%$, and high structural integrity, reflected in a gel fraction of $89.32 \pm 0.26\%$. Statistical analysis revealed that cellulose exerted a significant positive influence on yield, while swelling was strongly favored by the interaction between PVA and ECH. Gel fraction, in turn, was significantly impacted by PVA. Compared with standard cellulose, the cellulose obtained from bleached agave pulp showed statistically superior performance in all response variables, demonstrating its efficiency in hydrogel structuring. Therefore, the results highlight the potential of *Agave sisalana* leaf bagasse as a viable and promising alternative for the development of sustainable absorbent hydrogels, with strong potential applications in agriculture.

Keywords: biorefinery; circular economy; lignocellulosic biomass; natural polymer; absorbent material.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Quantidade de sisal produzida no Brasil. Destaque comparativo com a maior região produtora do país, o Estado da Bahia	27
Figura 2 – Agave sisalana	28
Figura 3 – Esquema mecânico da máquina paraibana (a), aspecto da folha parcialmente desfibrada (b) e da fibra recuperada (c), tecido de sisal (d) e corda (e) ...	29
Figura 4 – Bucha resultante do batimento das fibras de sisal	30
Figura 5 – Principais componentes estruturais da folha do agave	32
Figura 6 – Possibilidades de etapas de beneficiamento da biomassa lignocelulósica	33
Figura 7 – Estrutura da celobiose, unidade precursora da celulose	35
Figura 8 – Estrutura química das hemiceluloses	36
Figura 9 – Unidades básicas da lignina	36
Figura 10 – Fibrilação externa e interna da celulose após refino úmido.....	45
Figura 11 – Estrutura das reticulações química e física	47
Figura 12 – Fluxograma geral do trabalho.....	54
Figura 13 – Pré-tratamento alcalino	55
Figura 14 – Meio reacional ao final da etapa de branqueamento.....	56
Figura 15 – Moinho Jokro. (a) Vista frontal do equipamento. (b) características internas das ranhuras do moente de bronze junto a biomassa seca (c) Recipiente de batimento com a polpa hidratada após 12 h.....	57
Figura 16 – Sistema de resfriamento da solução de celulose	60
Figura 17 – Solubilização de cada fração macromolecular durante a etapa de fracionamento e branqueamento da biomassa	68
Figura 18 – Análise granulométrica do bagaço lavado, e da fração sólida de pré-tratamento e branqueamento	70
Figura 19 – Características visuais das biomassas a) lavada, b) pré-tratada e c) polpa branqueada	71
Figura 20 – Distribuição do tamanho de partículas das amostras refinadas. (a) Pasta integral e (b) sobrenadante	72
Figura 21 – Bandas FTIR das biomassas lavada, pré-tratada e polpa branqueada....	75
Figura 22 – Aspecto dos hidrogéis sintetizados em cada ensaio	77
Figura 23 – Perfil do grau de intumescimento dos hidrogéis.....	78

Figura 24 – Perfil de intumescimento dos hidrogéis sem celulose.....	79
Figura 25 – Perfil de perda da fração gel ao longo do intumescimento dos hidrogéis com celulose.....	80
Figura 26 – Perfil de perda da fração gel ao longo do intumescimento dos hidrogéis sem celulose	81
Figura 27 – Gráfico de Pareto da porcentagem de rendimento	85
Figura 28 – Superfície de resposta do rendimento	87
Figura 29 – Gráfico de Pareto da porcentagem de intumescimento	89
Figura 30 - Superfície de resposta da porcentagem do grau de intumescimento em relação às interações entre (a) polpa branqueada e poli (álcool vinílico), (b) epicloridrina e polpa branqueada e (c) epicloridrina e poli (álcool vinílico) ..	91
Figura 31 – Gráfico de Pareto da porcentagem fração gel	93
Figura 32- Superfície de resposta da porcentagem de fração gel em relação às interações entre (a) polpa branqueada e poli (álcool vinílico), b) epicloridrina e polpa branqueada e c) epicloridrina e poli (álcool vinílico).....	95
Figura 33 – Comparação entre o perfil do grau de intumescimento dos hidrogéis sintetizados com celulose comercial e com polpa de agave, nas condições ótimas	98
Figura 34 – Comparação entre o perfil da fração gel dos hidrogéis sintetizados com celulose comercial e com polpa de agave, nas condições ótimas	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de fibras Agave sisalana	34
Tabela 2 – Pré-tratamento utilizados para obtenção de celulose de Agave sp.	39
Tabela 3 – Aplicação de hidrogéis superabsorventes em diferentes áreas.....	51
Tabela 4 – Planejamento experimental para produção dos hidrogéis	59
Tabela 5 – Composição química da biomassa em cada etapa do processo	67
Tabela 6 – Parâmetros dimensionais da polpa de celulose obtidos por DLS	72
Tabela 7 – Bandas detectadas no FTIR e suas características	76
Tabela 8 – Rendimento, grau de intumescimento e fração gel obtidos em cada condição de processo, com e sem a presença de celulose	82
Tabela 9 – Coeficiente de regressão do rendimento dos hidrogéis.....	85
Tabela 10 – Análise da variância ANOVA para o rendimento dos hidrogéis	86
Tabela 11 – Coeficiente de regressão do grau de intumescimento dos hidrogéis	90
Tabela 12 – Análise da variância ANOVA para o grau de intumescimento dos hidrogéis	90
Tabela 13 – Coeficiente de regressão da fração gel dos hidrogéis.....	94
Tabela 14 – Análise da variância ANOVA para a fração gel dos hidrogéis	94
Tabela 15 – Comparação dos parâmetros avaliados nos hidrogéis produzidos com polpa branqueada de agave e celulose padrão, sob as melhores condições de síntese	101
Tabela 16 – Formulações e performances de hidrogéis reforçados com celulose	104

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	<i>Agave sisalana</i> e histórico do sisal no Brasil e no mundo	24
2.2	Beneficiamento do <i>Agave sisalana</i>	28
2.3	Potencial de biorrefinaria de <i>Agave sisalana</i>	31
2.4	Composição lignocelulósica das folhas de <i>Agave sisalana</i>	33
2.5	Fracionamento de agaves para obtenção de celulose	37
2.5.1	Pré-tratamento alcalinos seguido de etapa de branqueamento para obtenção de celulose	38
2.5.2	Fragmentação das fibras de celulose	42
2.6	Redes poliméricas, matrizes e reticulantes para formação de hidrogéis superabsorventes	45
2.6.1	Mecanismos de retenção hídrica e aplicações de hidrogéis	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	Obtenção e preparo das folhas de <i>Agave sisalana Perrine</i>	53
3.2	Pré-tratamento alcalino	55
3.3	Branqueamento da polpa	56
3.4	Obtenção de microfibrilas de celulose	56
3.5	Síntese dos hidrogéis de celulose de agave e controle	58
3.6	Comparação das propriedades do hidrogel de celulose de agave e celulose comercial	61
3.7	Análises físico-químicas para caracterização da biomassa, frações obtidas e hidrogéis produzidos	62
3.7.1	Análise granulométrica	62
3.7.2	Análise de composição química	62
3.7.3	Análise de distribuição de tamanho de partícula	63
3.7.4	Análise Infravermelho (ATR-FTIR)	63
3.7.5	Ensaio de grau de intumescimento em água e fração gel	64
4	RESULTADOS	66
4.1	Composição química do bagaço lavado e frações produzidas	66
4.2	Análise granulométrica do bagaço lavado e frações sólidas obtidas ...	70

4.3	Análise de Difusão Dinâmica de Luz (DLS) da polpa branqueada	71
4.4	Análise Infravermelho (ATR-FTIR) do bagaço lavado e frações obtidas	74
4.5	Síntese e análise dos hidrogéis com e sem a presença da polpa	76
4.5.1	Características visuais dos hidrogéis sintetizados	76
4.5.2	Comportamento cinético do grau de intumescimento e fração gel dos hidrogéis com e sem a presença de celulose	77
4.5.3	Análise estatística do rendimento dos hidrogéis de celulose	84
4.5.4	Análise estatística do grau de intumescimento dos hidrogéis com celulose.....	89
4.5.5	Análise estatística da fração gel dos hidrogéis de celulose	93
4.5.6	Comparação do hidrogel de celulose de agave e celulose comercial nas melhores condições de processo	97
5	CONCLUSÕES.....	106
	REFERÊNCIAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

O agave é uma cultura de destaque em regiões áridas e semiáridas ao redor do mundo, especialmente no México — seu centro de origem —, além de estar presente em outras áreas de clima quente, como o norte da América do Sul e o leste da África. No Brasil, a maior área de cultivo concentra-se na região Nordeste, onde as condições de solo e clima, caracterizadas pela baixa disponibilidade hídrica, favorecem seu desenvolvimento (Queiroga *et al.*, 2021; Raya *et al.*, 2023). A elevada resistência da planta à seca deve-se ao metabolismo ácido das crassuláceas (CAM), que restringe a evapotranspiração para o período noturno (Schiller; Bräutigam, 2021).

Entre as variedades cultivadas do gênero *Agave*, o Brasil se destaca pela produção de *Agave sisalana*, espécie da qual se obtêm as fibras de sisal. Em 2023, a produção nacional de fibras de sisal foi de aproximadamente 95,6 mil toneladas, com produtividade média de 922 kg/ha. O Estado da Bahia concentrou a maior parte dessa produção, sendo responsável por 94,6% do total nacional (IBGE, 2024).

A folha do sisal é constituída por um revestimento denominado polpa, popularmente conhecido como mucilagem, que corresponde a cerca de 15% de sua massa e tem a função de proteger as fibras, responsáveis por cerca de 3 a 5% da folha. Além disso, apresenta uma fração líquida, o caldo, que representa aproximadamente 80% da massa da folha e é composto principalmente por água e frutanos (Apolinário *et al.*, 2014; Silva; Beltrão, 1999).

Neste sentido, apenas 3 a 5% da biomassa possui valor comercial, enquanto o restante da massa da planta é considerado resíduo. Esse material apresenta desafios para o descarte adequado, sendo muitas vezes abandonado de forma inadequada nas áreas de produção. Embora alternativas como a compostagem ou a utilização na alimentação de ruminantes sejam empregadas, essas soluções ainda não são suficientes para resolver o problema do grande volume de resíduos gerados (Souza, 2016).

As folhas de *Agave sisalana* vem sendo estudadas para obtenção de carboidratos e outras macromoléculas de interesse industrial, aplicando conceitos de biorrefinarias, para produção de bioenergia (Damião *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2020) biopolímeros (Molina *et al.*, 2023) e produtos químicos renováveis (Apolinário *et al.*, 2017). As aplicações tradicionais das fibras de sisal concentram-se em setores como

artesanato, moda, fabricação de cordas, cordões e mantas agrícolas, entre outros usos similares. No entanto, essas aplicações apresentam baixo valor tecnológico agregado, o que limita seu potencial de impacto na melhoria das condições socioeconômicas das regiões produtoras e de suas populações (Severino; Franco; Sousa, 2023).

A composição lignocelulósica da folha de sisal destaca-se pelo elevado teor de celulose, que representa entre 54% e 78% de sua constituição. Além disso, são encontrados hemiceluloses em torno de 15%, lignina variando entre 8% e 13%, bem como outros componentes minoritários, como cinzas e extrativos (Leão, 2014; Zhu; Hao; Zhang, 2020). Devido a este alto teor de celulose, a busca por desenvolvimento de processos e produtos para valorização dessa fração polimérica é de grande interesse para esta biomassa.

Para obtenção da celulose com elevada pureza, a biomassa precisa ser submetida à processos de pré-tratamento e branqueamento visando promover a solubilização de grande parte das hemiceluloses e da lignina (Ferreira *et al.*, 2018). Uma das possibilidades de uso da celulose extraída das folhas de *Agave sisalana* é na formulação de géis hidrofílicos, onde a celulose extraída atua como polímero biológico capaz de atuar favoravelmente na estruturação de hidrogéis. Comumente combinadas a outros polímeros, de fase contínua, as estruturas fibrilares de celulose podem contribuir para a melhoria das propriedades de formação e hidrofílicas do material, ou seja, pode possivelmente colaborar e até promover aumento na capacidade de absorção de água (Mitani; Ozaki; Sato, 2022; Montesano *et al.*, 2015). Contudo, para que o potencial de absorção e retenção de água seja plenamente alcançado, é necessário que os polímeros aplicados estejam interligados por meio de pontos de junção, formando redes tridimensionais estáveis por meio do processo de reticulação. Nessas redes, a água é armazenada entre as malhas, promovendo sua expansão e, conseqüentemente, o aumento do volume do hidrogel. A reticulação pode ser promovida por agentes químicos que ampliam a quantidade de grupos hidroxila reativos nas superfícies das fibras e da matriz, favorecendo a interação entre os componentes do material (Mota; Gimenez, 2023).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a produção de hidrogéis superabsorventes a partir da celulose extraída das folhas de *Agave sisalana*. O caráter inovador da pesquisa está na escassez de estudos sobre o uso das fibras dessa espécie na produção de hidrogéis e na análise de seu desempenho quanto ao

grau de intumescimento e à formação da fração gel. Tal cenário evidencia a necessidade de explorar o potencial promissor do *Agave sisalana* como matéria-prima para o desenvolvimento de biomateriais inovadores e ambientalmente sustentáveis, como os hidrogéis.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou que houve viabilidade técnica da celulose extraída das folhas de *Agave sisalana* para a formulação de hidrogéis absorventes desde a preparação da biomassa até a avaliação funcional dos materiais desenvolvidos. O processo experimental que combinou pré-tratamento alcalino, branqueamento oxidativo-alcalino e refino mecânico, permitiu obter uma fração celulósica com alta pureza, conferindo à matéria-prima propriedades físico-químicas favoráveis à formação de redes poliméricas tridimensionais.

A pureza da fração celulósica alcançou $80,56 \pm 1,50\%$, após a remoção de $90,60 \pm 4,60\%$ da lignina e $90,70 \pm 2,70\%$ de remoção de hemiceluloses, com preservação de aproximadamente $92,30 \pm 3,10\%$ da massa celulósica inicial.

O pré-tratamento e o branqueamento foram determinantes para reduzir a complexidade química da biomassa e aumentar a acessibilidade das cadeias poliméricas de interesse, como visto através da suavização dos picos identificados no FTIR que apontou a remoção das frações não celulósicas. As condições operacionais adotadas foram capazes de minimizar degradações indesejadas da celulose, o que ficou evidenciado pela baixa perda de massa nas etapas de purificação, apenas $7,70 \pm 3,10\%$, valor significativamente inferior a outros tratamentos reportados na literatura.

O refino para alcançar a microfibrilação promoveu alterações morfológicas benéficas, que refletiram na exposição dos sítios ativos ($-\text{OH}$), formadores das ligações de hidrogênio com o poli (álcool vinílico) e ligações covalentes com o agente reticulante epicloridrina. Essas transformações estruturais promoveram a formação de redes poliméricas bem reticuladas no ensaio com melhor desempenho, validando assim o protocolo operacional desenvolvido.

Quando aplicada na formulação dos hidrogéis, a celulose da polpa branqueada melhorou a estabilidade estrutural, capacidade de intumescimento, e porcentagem de gel preservado. O ponto central do planejamento fatorial obteve a condição de melhor desempenho global, com concentrações intermediárias de celulose à $0,6\%$ (m/m), poli (álcool vinílico) à $6,5\%$ (m/m) e epicloridrina também à $6,5\%$ (m/m). Essas proporções propiciaram o melhor balanço entre intumescimento, fração gel e rendimento simultaneamente. Especificamente, os ensaios do ponto central alcançaram rendimento de $82,91 \pm 1,98\%$, grau de intumescimento de $518,34 \pm 3,16\%$ e fração gel de $89,32 \pm 0,26\%$, evidenciando que a proporção igual entre PVA e ECH com

concentração intermediária, favoreceu a organização adequada dos ligantes, com uma densidade de reticulação adequada para suportar a expansão da malha para entrada de água. Em termos estruturais, esse resultado revelou que existe a necessidade de balancear, principalmente, a quantidade de estruturas epóxi e de polímeros que conferem a densidade estrutural. Foi visto que o excesso de reticulante e baixa disponibilidade polimérica, formou uma rede muito frágil, ao passo que o excesso de polímero dificulta a expansão da rede para o inchaço. Então, o ensaio central ocupou, assim, a zona ótima dessas relações.

A comparação qualitativa indicou que a celulose obtida neste trabalho desempenhou superioridade em relação a celulose comercial avaliada e em outros da trabalhos da literatura. Em processos que utilizam nanoestruturas ou celulose de elevada pureza química, a relação entre custo e complexidade do processo de obtenção pode não valer a pena, visto que o uso de matérias-primas alternativas, como a folha de agave, através de um processamento facilitado mostrou-se eficiente para produção de hidrogéis. Além de promover implicações positivas no âmbito social, econômico e ambiental nas regiões sisaleiras, onde a valorização de resíduos agrícolas pode gerar impacto socioeconômico relevante para muitas famílias. Do ponto de vista de sustentabilidade, o desenvolvimento desses estudos contribuiu para agregar estratégias com potencial aplicação em biorrefinaria e economia circular, ao transformar produtos subvalorizados, neste caso o sisal de baixo valor agregado, em insumos de alto valor agregado e aplicações biotecnológicas.

Assim, reconhece-se também que houve limitações nas investigações, que são oportunidades para aprimoramento em trabalhos futuros, como a investigação da cinética máxima de absorção em períodos mais longos, avaliação do comportamento das malhas em ciclos repetidos de absorção e liberação de água, ensaios de biodegradabilidade em condições reais de solo e análise técnica e econômica de escalonamento da produção.

Por fim, o estudo desenvolvido comprovou que a celulose extraída e refinada a partir do bagaço das folhas do *Agave sisalana* constituiu uma matéria-prima viável, sustentável e economicamente atrativa para a produção de hidrogéis absorventes, oferecendo uma alternativa na aplicação no setor agrícola e que pode ser explorado para aplicações além dessa. Ainda, além dos benefícios ambientais, o uso desta matéria prima para incremento tecnológico tem o potencial de melhorar as questões socioeconômicas das regiões sisaleiras.

REFERÊNCIAS

- ABDUL, P.; ANUPKUMAR, N.; SRINIVASAN, M. P.; RANGARAJAN, S. New insight into the role of crosslinkers and composition on selectivity and kinetics of antimony uptake by chitosan - titania composite beads. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 1–13, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04158-7>>.
- AGBOR, V. B.; CICEK, N.; SPARLING, R.; BERLIN, A.; LEVIN, D. B. Biomass pretreatment : Fundamentals toward application. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 6, p. 675–685, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.005>>.
- AHMED, E. M. Hydrogel : Preparation , characterization , and applications : A review. **Journal of Advanced Research**, v. 6, n. 2, p. 105–121, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>>.
- ALCÂNTARA, J. A. C. DE. **REMOÇÃO DE LIGNINA E HEMICELULOSES DO SISAL UTILIZANDO PRÉ-TRATAMENTOS ÁCIDOS E ALCALINOS**. 2016. 2016.
- ÁLVAREZ-CHÁVEZ, J.; VILLAMIEL, M.; SANTOS-ZEA, L.; RAMÍREZ-JIMÉNEZ, A. K. Agave By-Products: An Overview of Their Nutraceutical Value, Current Applications, and Processing Methods. **Polysaccharides**, v. 2, n. 3, p. 720–743, 2021.
- ALVES, M. O.; SANTIAGO, E. G.; LIMA, A. R. M. DIAGNÓSTICO SOCIOECONÔMICO DO SETOR SISALEIRO DO NORDESTE BRASILEIRO. **Banco do Nordeste do Brasil**, 2005.
- AMBROSIO, L.; DEMITRI, C.; SANNINO, A. **Superabsorbent cellulose-based hydrogels for biomedical applications**. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2011. 25–50 p.
- ANDER, P.; BAUER, W.; HEINEMANN, S.; KALLIO, P.; PASSAS, R.; TREIMANIS, A. **Characterisation of the fine structure and properties of papermaking fibres using new technologies**. [s.l: s.n.]
- APOLINÁRIO, A. C.; DAMASCENO, B. P. G. de L.; BELTRÃO, N. E. de M.; PESSOA, A.; CONVERTI, A.; SILVA, J. A. da. Inulin-type fructans : A review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. **Carbohydrate Polymers**, v. 101, p. 368–378, 2014.
- APOLINÁRIO, A. C.; DE CARVALHO, E. M.; DE LIMA DAMASCENO, B. P. G.; DA SILVA, P. C. D.; CONVERTI, A.; PESSOA, A.; DA SILVA, J. A. Extraction, isolation and characterization of inulin from Agave sisalana boles. **Industrial Crops and Products**, v. 108, p. 355–362, 1 dez. 2017.
- ARAUJO, L. L. **Estudo da difusão de Ag e Al em α -Ti utilizando as técnicas de espectrometria de retroespalhamento Rutherford e reação nuclear**. 2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2000.

ASSIS, C. A. De; BIOMATERIALS, F.; CAROLINA, N. Cellulose micro- and nanofibrils (CMNF) manufacturing - financial and risk assessment. **Biofpr**, p. 1–14, 2017a.

ASSIS, C. A. De; BIOMATERIALS, F.; CAROLINA, N. Conversion Economics of Forest Biomaterials : Risk and Financial Analysis of CNC Manufacturing. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, 2017b.

BARDONE, E.; MARZOCHELLA, A.; KESHAVARZ, T.; TAVARES DA SILVA, R.; DAMIÃO XAVIER, F.; LUCENA DE MEDEIROS, L.; LUIZ, F.; DA SILVA, H.; SUELY MADRUGA, M.; MARIA DA CONCEIÇÃO, M. Hydrothermal Treatment Of Sisal Bagasse. v. 64, 2018. Disponível em: <www.aidic.it/cet>. Acesso em: 17 nov. 2022.

BARRETO, A. C. H.; ESMERALDO, M. A.; ROSA, D. S.; FECHINE, P. B. A.; MAZZETTO, S. E. Cardanol Biocomposites Reinforced with Jute Fiber: Microstructure, Biodegradability, and Mechanical Properties. **Polymers and Polymer Composites**, v. 16, n. 2, p. 101–113, 2010.

BARROS, S. de S. **Síntese e caracterização de nanocelulose a partir da folha de abacaxi (Ananás comosus (L) Merrill) CV. Vitória**. 2020. UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS, 2020.

BARY, E. M. A.; FEKRI, A.; SOLIMAN, Y. A.; HARMAL, A. N. Characterization and swelling – deswelling properties of porous superabsorbent hydrogel membranes made of PVA and Ziziphus spina-christi fibers reinforced with nanosilica manufactured by compression moulding process. **Polymer Bulletin**, v. 75, n. 11, p. 4977–4997, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00289-018-2315-0>>.

BORLAND, A. M.; HARTWELL, J.; WESTON, D. J.; SCHLAUCH, K. A.; TSCHAPLINSKI, T. J.; TUSKAN, G. A.; YANG, X.; CUSHMAN, J. C. Engineering crassulacean acid metabolism to improve water-use efficiency. **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 5, p. 327–338, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2014.01.006>>.

BRITO, J. Q. A.; DIAS, F. D. S.; CUNHA, S.; RAMOS, L. P.; TEIXEIRA, L. S. G. Multiple response optimization of alkaline pretreatment of sisal fiber (Agave sisalana) assisted by ultrasound. **Biotechnology Progress**, n. November 2018, p. 1–9, 2019.

CAI, J.; ZHANG, L. Unique Gelation Behavior of Cellulose in NaOH / Urea Aqueous Solution. **Biomacromolecules**, p. 183–189, 2006.

CAI, J.; ZHANG, L.; LIU, S.; LIU, Y.; XU, X.; CHEN, X.; CHU, B.; GUO, X.; XU, J.; CHENG, H.; HAN, C. C. Dynamic Self-Assembly Induced Rapid Dissolution of Cellulose at Low Temperatures. **Macromolecules**, p. 9345–9351, 2008.

CAMPOS, F.; NASCIMENTO, D. O.; PROF, O.; CASTRO, A. D. E.; PROF, C.; LIZ, D. S.; VIANNA, C. **Estudo do desempenho de membranas poliméricas de pva reticuladas na retenção de íons de efluentes de aterro sanitário**. 2019.

Universidade Federal Fluminense, 2019.

CERQUEIRA, J. C.; APARECIDA, B.; MACHADO, S. **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOCRISTAIS DE CELULOSE**. [s.l: s.n.].

CHAKA, K. T. Extraction of cellulose nanocrystals from agricultural by-products : a review. v. 15, n. 3, p. 582–597, 2022.

CHANG, C.; DUAN, B.; CAI, J.; ZHANG, L. Superabsorbent hydrogels based on cellulose for smart swelling and controllable delivery. **European Polymer Journal**, v. 46, n. 1, p. 92–100, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2009.04.033>>.

CHANG, C.; LUE, A.; ZHANG, L. Effects of Crosslinking Methods on Structure and Properties of Cellulose / PVA Hydrogels. **Macromolecular Journals**, p. 1266–1273, 2008.

CHERUBINI, F. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 7, p. 1412–1421, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>>.

CHINGA-CARRASCO, G. Cellulose fibres , nanofibrils and microfibrils : The morphological sequence of MFC components from a plant physiology and fibre technology point of view. **Nanoscale Research Letters**, v. 6, n. 1, p. 417, 2011a. Disponível em: <<http://www.nanoscalereslett.com/content/6/1/417>>.

CHINGA-CARRASCO, G. Cellulose fibres , nanofibrils and microfibrils : The morphological sequence of MFC components from a plant physiology and fibre technology point of view. **Nanoscale Research Letters**, p. 1–7, 2011b.

CLAUSER, N. M.; FELISSIA, F. E.; AREA, M. C.; VALLEJOS, M. E. Design of nano and micro fibrillated cellulose production processes from forest industrial wastes in a multiproduct biorefinery. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 7, p. 1–14, 2020.

CONAB. Sisal - Análise mensal. n. 61, p. 1–5, 2025.

CUTRIM, F. M.; RAMOS, E. C. S. S.; ABREU, M. C. C.; GODINHO, A. S.; MACIEL, A. P.; CAVALCANTE, K. S. B. A Study of Chemical Composition and Enzymatic Hydrolysis of Solid Organic Waste from Agrosilvopastoral Systems. **Sociedade Brasileira de Química**, v. 30, n. 9, p. 1955–1963, 2019.

DAMIÃO, F.; BEZERRA, G. S.; FLORENTINO, S.; SANTOS, M.; CONRADO, S.; SILVA, H.; JOICE, A.; SILVA, O.; MARIA, M. Evaluation of the Simultaneous Production of Xylitol and Ethanol from Sisal Fiber. **Biomolecules**, p. 1–13, 2018.

DARDEER, H. M.; GAD, A. N.; MAHGOUB, M. Y. Promising superabsorbent hydrogel based on carboxymethyl cellulose and polyacrylic acid : synthesis , characterization , and applications in fertilizer engineering. **BMC Chemistry**, p. 1–13, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s13065-024-01244-w>>.

DAS, D.; PRAKASH, P.; ROUT, P. K.; BALADHARE, S. Synthesis and Characterization of Superabsorbent Cellulose-based Hydrogel for Agriculture Application. **Tripura University**, 2020.

DAVIS, S. C. Agave americana : Characteristics and Potential Breeding Priorities. 2022.

DORA, S.; BHASKAR, T.; SINGH, R.; NAIK, D. V.; ADHIKARI, D. K. Bioresource Technology Effective catalytic conversion of cellulose into high yields of methyl glucosides over sulfonated carbon based catalyst. **Bioresource Technology**, v. 120, p. 318–321, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.036>>.

DU, Z.; WANG, N.; DU, J. Recent Progress in Cellulose-Based Conductive Hydrogels. **Polymers**, p. 1–33, 2025.

DUVAL, A.; LAWOKO, M. Reactive & Functional Polymers A review on lignin-based polymeric , micro- and nano-structured materials. **Reactive and Functional Polymers**, v. 85, p. 78–96, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.017>>.

FALCÃO, M. L. C.; QUEIROZ, Á. A. A. de. Universidade federal de itajubá. 2003.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2023**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em: 4 fev. 2025.

FAZIRAH, D.; ABG, B.; WASLI, M. E.; SOO, C.; TAN, Y.; MUSA, Z.; CHIN, S. F. Eco - friendly cellulose - based hydrogels derived from wastepapers as a controlled - release fertilizer. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, p. 1–11, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40538-023-00407-6>>.

FERREIRA, F. V.; MARIANO, M.; RABELO, S. C.; GOUVEIA, R. F.; LONA, L. M. F. Isolation and surface modification of cellulose nanocrystals from sugarcane bagasse waste: From a micro- to a nano-scale view. **Applied Surface Science**, v. 436, p. 1113–1122, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.137>>.

FIGUEIROA, D. S. **AVALIAÇÃO DE PRÉ-TRATAMENTOS QUÍMICOS NO BAGAÇO DE SISAL**. 2017. 2017.

FU, L.-H.; QI, C.; MA, M.-G.; PENGBO WAN. Multifunctional cellulose-based hydrogels for biomedical applications. **Royal Society of Chemistry**, p. 1541–1562, 2019.

GARCIA-OCHOA, F.; VERGARA, P.; WOJTUSIK, M.; GUTI, S.; SANTOS, V. E.; LADERO, M.; VILLAR, J. C. Multi-feedstock lignocellulosic biorefineries based on biological processes : An overview. **Industrial Crops & Products journal**, v. 172, n. September, 2021.

GARCÍA-VILLALBA, W. G.; RODRÍGUEZ-HERRERA, R.; OCHOA-MARTÍNEZ, L. A.; RUTIAGA-QUI, O. M.; GALLEGOS-INFANTE, A.; MARINA, S.; BERMÚDEZ-QUI, G. Comparative study of four extraction methods of fructans (agavins) from Agave

durangensis : Heat treatment , ultrasound , microwave and simultaneous ultrasound-microwave. **Food Chemistry**, v. 415, n. July 2022, 2023.

GARG, M.; MATHIEU, V. A. Moisture uptake in nanocellulose : the effects of relative humidity , temperature and degree of crystallinity. **Springer**, v. 9, p. 9007–9021, 2021.

GARNICA-PALAFOX; SÁNCHEZ-ARÉVALO, F. M.; VELASQUILLO, C.; GARCÍA-CARVAJAL, Z. Y.; GARCÍA-LÓPEZ, J.; ORTEGA-SÁNCHEZ, C.; IBARRA, C.; LUNA-BÁRCENAS, G.; SOLÍS-ARRIETA, L. Mechanical and structural response of a hybrid hydrogel based on chitosan and poly (vinyl alcohol) cross- linked with epichlorohydrin for potential use in tissue engineering. **Journal of Biomaterials Science, Polymer**, v. 5063, 2014.

GOMIDE, J. L.; NETO, H. F.; REGAZZI, A. J. Analysis of wood quality criteria of eucalyptus wood for kraft pulp production. **Revista Árvore**, v. 34, p. 339–344, 2010.

GUERRA, G. N.; CHRISTINE, E.; CABRAL, D. M.; MARIA, L.; CAMPOS, A.; ANTÔNIO, L.; PONTES, M. Chemical and Physicochemical Characterization of Alkali Pretreated and in Natura Sisal Solid Waste Chemical and Physicochemical Characterization of Alkali Pretreated and in Natura Sisal Solid Waste. **Journal of Natural Fibers**, v. 00, n. 00, p. 1–10, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1612815>>.

GUO, Y.; GUO, R.; SHI, X.; LIAN, S.; ZHOU, Q.; CHEN, Y.; LIU, W.; LI, W. International Journal of Biological Macromolecules Synthesis of cellulose-based superabsorbent hydrogel with high salt tolerance for soil conditioning. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 209, n. PA, p. 1169–1178, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.039>>.

HAFEMANN, E.; BATTISTI, R.; BRESOLIN, D.; MARANGONI, C.; MACHADO, R. A. F. Enhancing Chlorine-Free Purification Routes of Rice Husk Biomass Waste to Obtain Cellulose Nanocrystals. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 12, p. 6595–6611, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12649-020-00937-2>>.

HAN, Y.; BAI, Y.; ZHANG, J.; LIU, D.; ZHAO, X. A comparison of different oxidative pretreatments on polysaccharide hydrolyzability and cell wall structure for interpreting the greatly improved enzymatic digestibility of sugarcane bagasse by delignification. **Bioresources and Bioprocessing**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40643-020-00312-y>>.

HAQUE, O.; MONDAL, I. H. Cellulose-Based Hydrogel for Personal Hygiene Applications. **Springer International Publishing**, p. 1–21, 2018.

HEON, B.; MIN, J.; NGUYEN, V.; KIM, H.; WON, C.; KEUN, J.; LEE, C.; YOO, J.; KI, B.; KIM, S. K. Functionalized methyl cellulose / LiClO₄ composite as an environmentally friendly quasi-solid polymer electrolyte for solid- state electrochromic devices and cellulose-based supercapacitors. **Materials Today Energy**, v. 33, p. 101263, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.101263>>.

HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, H. M.; CHANONA-PÉREZ, J. J.; VEGA, A.; LIGERO, P.; FARRERA-REBOLLO, R. R.; MENDOZA-PÉREZ, J. A.; CALDERÓN-DOMÍNGUEZ, G.; VERA, N. G. Spectroscopic and Microscopic Study of Peroxyformic Pulping of Agave Waste. p. 1084–1097, 2016.

HERNÁNDEZ, J.; ROMERO, V.; ESCALANTE, A.; TORÍZ, G.; ROJAS, O. J.; SULBARÁN, B. Agave tequilana Bagasse as Source of Cellulose Nanocrystals via Organosolv Treatment. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 3603–3614, 2018.

HIMMEL, M. **Biomass Recalcitrance: Deconstructing the Plant Cell Wall for Bioenergy**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009.

HOFFMAN, A. S. Hydrogels for biomedical applications ☆. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 64, p. 18–23, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.010>>.

HU, L.; FANG, X.; DU, M.; LUO, F.; GUO, S. Hemicellulose-Based Polymers Processing and Application. p. 2066–2079, 2020.

IBGE. **Produção Agrícola - Lavoura Permanente**.

IBGE. **Produção de Sisal (fibra)**.

IVANOVSKI, M.; PETROVIC, A.; BAN, I.; GORICANEC, D.; URBANCL, D. Determination of the Kinetics and Thermodynamic Parameters of Lignocellulosic Biomass Subjected to the Torrefaction Process. **Materials**, 2021.

JOAQUIM, A. P.; TONOLI, G. H. D.; SANTOS, S. F. Dos; SAVASTANO, H. Sisal organosolv pulp as reinforcement for cement based composites. **Materials Research**, v. 12, n. 3, p. 305–314, 2009.

KADLA, J. F.; CHANG, H. The Reactions of Peroxides with Lignin and Lignin Model Compounds. **American Chemical Society**, p. 108–129, 2001.

KARGARZADEH, H.; HUANG, J.; LIN, N.; AHMAD, I.; MARIANO, M.; DUFRESNE, A.; THOMAS, S.; GAŁ, A. Progress in Polymer Science Recent developments in nanocellulose-based biodegradable polymers , thermoplastic polymers , and porous nanocomposites. **Progress in Polymer Science**, v. 87, p. 197–227, 2018.

KARP, S. G.; WOICIECHOWSKI, A. L.; SOCCOL, V. T.; SOCCOL, R. Pretreatment Strategies for Delignification of Sugarcane Bagasse : A Review. **BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY**, v. 56, n. August, p. 679–689, 2013.

KASCHUK, J. J.; LACERDA, T. M.; FROLLINI, E. Enzymatic hydrolysis of mercerized and unmercerized sisal pulp. **Springer Science**, p. 2437–2453, 2017.

KHALID, M. Y.; AL RASHID, A.; ARIF, Z. U.; AHMED, W.; ARSHAD, H.; ZAIDI, A. A. Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. **Results in Engineering**, v. 11, n. April, p. 100263, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>>.

KHENBLOUCHE, A.; BECHKI, D.; GOUAMID, M.; CHARRADI, K.; SEGNI, L. Extraction and characterization of cellulose microfibers from *Retama raetam* stems. **Polímeros**, v. 5169, n. 1, p. 1–8, 2019.

KIM, T. H. Pretreatment of lignocellulosic biomass. *In*: **Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Polymers**. [s.l.: s.n.]p. 91–109.

KLEMM, D.; KLEMM, D.; KRAMER, F.; MORITZ, S.; LINDSTRÖM, T.; ANKERFORS, M.; GRAY, D.; DORRIS, A. Reviews Nanocelluloses : A New Family of Nature-Based Materials Angewandte. **Angewandte Chemie**, p. 5438–5466, 2011.

LASA, H. De; SALAICES, E.; MAZUMDER, J.; LUCKY, R. Catalytic Steam Gasification of Biomass : Catalysts , Thermodynamics and Kinetics. p. 5404–5433, 2019.

LATEBO, S.; ABETO, T.; ZENEBE, E. Enhanced cellulose extraction from agave plant (*Agave americana* Species) for synthesis of magnetic / cellulose nanocomposite for defluoridation of water. **Materials Today Communications**, v. 38, n. November 2023, p. 107683, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107683>>.

LEÃO, D. A. S. POTENCIALIDADE DE OBTENÇÃO DE ETANOL A PARTIR DA FIBRA DO SISAL. **Implementation Science**, v. 39, n. 1, p. 1–15, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025>><<http://dx.doi.org/10.1038/nature10402>><<http://dx.doi.org/10.1038/nature21059>><<http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127>><<http://dx.doi.org/10.1038/nrmicro2577>><<http://>>.

LI, J.; HENRIKSSON, G.; GELLERSTEDT, G. Lignin depolymerization / repolymerization and its critical role for delignification of aspen wood by steam explosion. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 3061–3068, 2007.

LIMA, C. S. S.; CONCEIÇÃO, M. M.; SILVA, F. L. H.; LIMA, E. E.; CONRADO, L. S.; LEÃO, D. A. S. Characterization of acid hydrolysis of sisal. **Applied Energy**, v. 102, p. 254–259, 2013a.

LIMA, C. S. S.; CONCEIÇÃO, M. M.; SILVA, F. L. H.; LIMA, E. E.; CONRADO, L. S.; LEÃO, D. A. S. Characterization of acid hydrolysis of sisal. **Applied Energy**, v. 102, p. 254–259, 1 fev. 2013b.

LÜTTGE, U. Ecophysiology of Crassulacean Acid Metabolism (CAM). **Annals of Botany**, 2004.

MAGALHÃES, E. A. S. Implicações do uso de aditivos sobre as características fermentativas de silagens de mucilagem de sisal. **Acta Botanica Brasilica**, v. 5, n. 2, p. 135–142, 2019.

MALIK, S.; MUHAMMAD, K.; WAHEED, Y. Nanotechnology: A Revolution in Modern

Industry. **Molecules**, v. 28, n. 2, 2023.

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

MARAKANA, P. G.; DEY, A.; SAINI, B. Isolation of nanocellulose from lignocellulosic biomass: Synthesis, characterization, modification, and potential applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106606, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106606>>.

MARIANO, M.; CERCENÁ, R.; SOLDI, V. Thermal characterization of cellulose nanocrystals isolated from sisal fibers using acid hydrolysis. **Industrial Crops and Products**, v. 94, p. 454–462, dez. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.011>>.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; DA SILVA, O. R. R. F.; MATTOSO, L. H. C. Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents. **Thermochimica Acta**, v. 506, n. 1–2, p. 14–19, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2010.04.008>>.

MARTIN, A. R.; SILVA, O. R. R. F. Caracterização Química e Estrutural de Fibra de Sisal da Variedade Agave sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, p. 40–46, 2009.

MITANI, E.; OZAKI, Y.; SATO, H. Two types of C – O ... HO hydrogen bonds and OH ... OH (dimer , trimer , oligomer) hydrogen bonds in PVA with 88 % saponification / PMMA and PVA with 99 % saponification / PMMA blends and their thermal behavior studied by infrared spectroscopy. **Polymer**, v. 246, n. December 2021, p. 124725, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124725>>.

MO, M.; WU, C.; CHEN, Y. Bacterial Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogel for Wet Wound Dressing. **Molecules**, 2025.

MOHAMED, B. N.; CHIN, S. F.; WASLI, M. E. Effects of Plasticiser on the Morphology and Swelling Properties of Cellulose-based Hydrogels Derived from Wastepaper. **Journal of Physical Science**, v. 34, n. 3, p. 53–65, 2023.

MOLINA, A.; KOTHARI, A.; ODUNDO, A.; PRAKASH, M. Agave sisalana: towards distributed manufacturing of absorbent media for menstrual pads in semi-arid regions. **Communications Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1–14, 2023.

MONTESANO, F. F.; PARENTE, A.; SANTAMARIA, P.; SANNINO, A.; SERIO, F. Biodegradable Superabsorbent Hydrogel Increases Water Retention Properties of Growing Media and Plant Growth. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 451–458, 1 jan. 2015.

MORÁN, J. I.; ALVAREZ, V. A.; CYRAS, V. P.; VÁZQUEZ, A. Extraction of cellulose

and preparation of nanocellulose from sisal fibers. **Cellulose**, v. 15, n. 1, p. 149–159, fev. 2008.

MOTA, L. O.; GIMENEZ, I. F. Cellulose-Based Materials Crosslinked with Epichlorohydrin: A Mini Review. **Revista Virtual de Química**, v. 15, n. 1, p. 159–170, 2023.

NAVAF, M. Impact of Different Cross-Linking Agents on Functional , Rheological , and Structural Properties of Talipot Palm Starch : A New Source of Stem Starch †. **Biology and Life Sciences Forum**, 2022.

ORIEZ, V.; PONTALIER, P. Lignocellulosic Biomass Mild Alkaline Fractionation and Resulting Extract Purification Processes: Conditions, Yields, and Purities. **Clean Technologies**, p. 91–115, 2020.

OSMAN, A. I.; ABDELKADER, A.; JOHNSTON, C. R.; MORGAN, K.; ROONEY, D. W. Thermal investigation and kinetic modeling of lignocellulosic biomass combustion for energy production and other applications. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2017.

PALOMO-BRIONES, R.; LÓPEZ-GUTIÉRREZ, I.; ISLAS-LUGO, F.; GALINDO-HERNÁNDEZ, K. L.; MUNGUÍA-AGUILAR, D.; RINCÓN-PÉREZ, J. A.; CORTÉS-CARMONA, M. Á.; ALATRISTE-MONDRAGÓN, F.; RAZO-FLORES, E. Agave bagasse biorefinery: processing and perspectives. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 7, p. 1423–1441, 2018.

PANDEY, M.; CAIRUL, M.; MOHD, I.; AHMAD, N.; ABEER, M. M. Rapid Synthesis of Superabsorbent Smart-Swelling Bacterial Cellulose / Acrylamide-Based Hydrogels for Drug Delivery. **International Journal of Polymer Science**, v. 2013, 2013.

PATEL, A.; SHAH, A. 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, 1 maio 2021.

PLÁCIDO, J.; CAPAREDA, S. Analysis of alkali ultrasonication pretreatment in bioethanol production from cotton gin trash using FT-IR spectroscopy and principal component analysis. **Bioresources and Bioprocessing**, p. 1–9, 2020.

POLETO, M.; JÚNIOR, H. L. O.; ZATTERA, A. J. Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. **Materials**, p. 6105–6119, 2014.

POTULSKI, D. C. **Mecânicas de papel primário e reciclado de pinus e eucalyptus**. 2016. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2016.

QUEIROGA, V. D. P.; SILVA, O. R. R. F. DA; MEDEIROS, J. D. C.; FRANCO, C. F. D. O. **SISAL (Agave sisalana, Perrine) TECNOLOGIAS DE PLANTIO E UTILIZAÇÃO**. [s.l: s.n.]

RANA, A. K.; KUMAR, V.; HART, P.; KUMAR, V. Cellulose-alginate hydrogels and their nanocomposites for water remediation and biomedical applications.

Environmental Research, v. 243, n. December 2023, p. 117889, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117889>>.

RANA, S. S.; KUMAR, R.; GUPTA, M. K. Investigation of mechanical and thermal behavior of sisal fibre reinforced polymer biocomposites Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the Indo-European Conference on Advanced Manufacturing and Materials Processing. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.167>>. Acesso em: 22 jul. 2023.

RAVINDRAN, R.; JAISWAL, A. K. Bioresource Technology A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste : Challenges and opportunities. **BITE**, v. 199, p. 92–102, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.106>>.

RAYA, F.; CARVALHO, L. M. De; RAYA, F. T.; CARVALHO, L. M. De; JOSÉ, J.; PRADO, L.; ALMEIDA, R. L.; ALVES, H.; DELEVATTI, D. A.; SILVEIRA, N. M.; FERREIRA, S.; PISSOLATO, M. D.; GUILHERME, L.; ABREU, F. De; GUTIÉRREZ, J.; SOTELO, J. N.; RIBEIRO, R. V. Rescuing the Brazilian Agave breeding program : morphophysiological and molecular characterization of a new germplasm Rescuing the Brazilian Agave breeding program : morphophysiological and molecular characterization of a new germplasm. **Frontiers in Chemical Engineering**, n. September, 2023.

REDDY, K. O.; ZHANG, J.; ZHANG, J.; RAJULU, A. V. Preparation and properties of self-reinforced cellulose composite films from Agave microfibrils using an ionic liquid. **Carbohydrate Polymers**, v. 114, p. 537–545, 2014.

RIBEIRO, A. B.; MOREIRA, H.; PEREIRA, S. I. A.; GODINHO, M.; SOFIA, A.; CASTRO, P.; PEREIRA, C. F.; CASANOVA, F.; FREIXO, R.; RAMOS, L. Bio-based superabsorbent hydrogels for nutrient release. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. January, 2024.

ROBERTO, C. Hydrogen peroxide bleaching of cellulose pulps obtained from brewer's spent grain. **Springer Science**, p. 641–649, 2008.

ROSTAMI, J.; SELLMAN, F. A.; LILLBERG, E.; REBECCA, O.; WA, L.; BENSELFELT, T. All-Cellulose Superabsorbent Heterostructures Comprising Fiber Aerogels and Nanofibril Sheets. **Chemistry of Materials**, 2025.

SANTOS, A. L. do N. dos; VIEIRA, É. D.; ALINE MOTAA, I.; FERREIRA, R.; SANTANA, S. de M.; CRUZ, D. M. da. AGAVE SISALANA AS A BIOMASS SOURCE FOR ETHANOL AGAVE SISALANA COMO FONTE DE BIOMASSA PARA A. **VI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY (SIINTEC)**, p. 1–8, 2020.

SANTOS, R. D. dos; NEVES, A. L. A.; PEREIRA, L. G. R.; ARAÚJO, G. G. L. de; VOLTOLINI, T. V.; OLIVEIRA, G. F. de. Coprodutos do Desfibramento do Sisal como Alternativa na Alimentação de Ruminantes. **Circular Técnica 102, EMBRAPA**, p. 1–6, 2013.

SCHILLER, K.; BRÄUTIGAM, A. Engineering of Crassulacean Acid Metabolism. **Annual Review of Plant Biology**, p. 77–103, 2021.

SEOK, J.; LEE, Y. Y.; HYUN, T. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 199, p. 42–48, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>>.

SEVERINO, L. S.; FRANCO, C. F. de O.; SOUSA, M. F. de. Proposta de um modelo de produção sustentável e competitivo para o sisal brasileiro. **Embrapa Algodão**, 2023.

SILVA, F. P. M. da. O território do sisal: As políticas territoriais rurais e a articulação governo federal e estadual : um estudo de caso da Bahia. *In: O território do sisal*. [s.l: s.n.]p. 152–177.

SILVA, O. R. R. F. da; BELTRÃO, N. E. M. **agronegocio do sisal no BR.pdf**1999.

SINGH, M.; PAHAL, V.; AHUJA, D. Isolation and characterization of microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose with “ biomechanical hotspots ”. **Carbohydrate Polymers**, v. 234, n. January, p. 115827, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115827>>.

SISALSUL. **Loja online**.

SLUITER, J. B.; CHUM, H.; GOMES, A. C.; TAVARES, R. P. A.; AZEVEDO, V.; PIMENTA, M. T. B.; RABELO, S. C.; MARABEZEI, K.; CURVELO, A. A. S.; ALVES, A. R.; GARCIA, W. T.; CARVALHO, W.; ESTEVES, P. J.; MENDONÇA, S.; OLIVEIRA, P. A.; RIBEIRO, J. A. A.; MENDES, T. D.; VICENTIN, M. P.; DUARTE, C. L.; MORI, M. N. Evaluation of Brazilian sugarcane bagasse characterization: An interlaboratory comparison study. **Journal of AOAC International**, v. 99, n. 3, p. 579–585, 2016.

SONG, P.; XU, Z.; GUO, Q. Bioinspired Strategy to Reinforce PVA with Improved Toughness and Thermal Properties via Hydrogen-Bond Self-Assembly. 2013.

SOUZA, M. B. **Coprodutos do desfibramento do sisal na produção de silagem**. 2016. Universidade do Reconcavo Baiano, 2016.

STRICHER, M.; SARDE, C.; GU, E.; EGLES, C. Cellulosic / Polyvinyl Alcohol Composite Hydrogel : Synthesis , Characterization and Applications in Tissue Engineering. **Polymers**, 2021.

SUN, J. X.; SUN, X. F.; ZHAO, H.; SUN, R. C. Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. **Polymer Degradation and Stability**, v. 84, n. 2, p. 331–339, maio 2004.

SUN, J.; ZHANG, L.; LOH, K. Revisiting alkali pretreatment to transform lignocellulose fermentation with integration of bioprocessible lignin. **Waste Management**, v. 192, n. November 2024, p. 82–90, 2025.

SUN, S.; CAO, X.; XU, F.; SUN, R.; LLOYD, G.; BAIRD, M. Structure and thermal

property of alkaline hemicelluloses from steam exploded *Phyllostachys pubescens*. **Carbohydrate Polymers**, v. 101, p. 1191–1197, 2014.

TAKKELLAPATI, S.; LI, T.; GONZALEZ, M. A. An overview of biorefinery - derived platform chemicals from a cellulose and hemicellulose biorefinery. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 7, p. 1615–1630, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10098-018-1568-5>>.

TELES, M. J. M.; SOUZA, J. C. P. de; OLIVEIRA, M. S. **CANA-DE-AÇÚCAR PARA APLICAÇÃO COMO AGENTE DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DO HERBICIDA CANA-DE-AÇÚCAR PARA APLICAÇÃO COMO AGENTE**. 2022. INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE, 2022.

TEODORO, K. B. R.; DE ELIANGELA, M. T.; CORRÊA, A. C.; DE CAMPOS, A.; MARCONCINI, J. M.; MATTOSO, L. H. C. Whiskers de fibra de sisal obtidos sob diferentes condições de hidrólise ácida: Efeito do tempo e da temperatura de extração. **Polimeros**, v. 21, n. 4, p. 280–285, 2011.

THIVYA, P.; AKALYA, S.; SINIJA, V. R. A comprehensive review on cellulose-based hydrogel and its potential application in the food industry. **Applied Food Research**, v. 2, n. 2, p. 100161, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100161>>.

TUTUS, A. Bleaching of Rice Straw Pulps with Hydrogen Peroxide. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, 2004.

UDOETOK, I. A.; DIMMICK, R. M.; WILSON, L. D.; HEADLEY, J. V. Adsorption properties of cross-linked cellulose-epichlorohydrin polymers in aqueous solution. **Carbohydrate Polymers**, v. 136, p. 329–340, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.09.032>>.

ULLAH, F.; BISYRUL, M.; JAVED, F.; AKIL, H. Classification, processing and application of hydrogels: A review Faheem. v. 57, p. 414–433, 2015.

VÂRBAN, R.; CRISAN, I.; VÂRBAN, D.; ONA, A.; OLAR, L.; STOIE, A.; STEFAN, R. applied sciences Comparative FT-IR Prospecting for Cellulose in Stems of Some. **Applied Sciences**, 2021.

VELÁZQUEZ-VALADEZ, U.; FARÍAS-SÁNCHEZ, J. C.; VARGAS-SANTILLÁN, A.; CASTRO-MONTOYA, A. J. Tequilana weber Agave Bagasse Enzymatic Hydrolysis for the Production of Fermentable Sugars : Oxidative-Alkaline Pretreatment and Kinetic Modeling. **BioEnergy Research**, p. 998–1004, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12155-016-9757-8>>.

VIEIRA, F.; SANTANA, H. E. P.; JESUS, M.; MATA, F.; PIRES, P.; VAZ-VELHO, M.; SILVA, D. P.; RUZENE, D. S. Comparative Study of Pretreatments on Coconut Fiber for Efficient Isolation of Lignocellulosic Fractions. **Sustainability**, p. 1–21, 2024.

WANG, M.; BAI, J.; SHAO, K.; TANG, W.; ZHAO, X.; LIN, D.; HUANG, S.; CHEN, C.;

DING, Z.; YE, J. Review Article Poly (vinyl alcohol) Hydrogels : The Old and New Functional Materials. v. 2021, 2021.

ZHANG, S.; LI, F.; YU, J.; HSIEH, Y. Dissolution behaviour and solubility of cellulose in NaOH complex solution. **Carbohydrate Polymers**, v. 81, n. 3, p. 668–674, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.029>>.

ZHONG, Y.; SEIDI, F.; LI, C.; WAN, Z.; JIN, Y. Antimicrobial / biocompatible hydrogels dual-reinforced by cellulose as ultra-stretchable and rapid self-healing wound dressing. **Department of Chemical Engineering, University of New Brunswick, Fredericton**, 2021.

ZHOU, Z.; OUYANG, D.; LIU, D.; ZHAO, X. Bioresource Technology Oxidative pretreatment of lignocellulosic biomass for enzymatic hydrolysis : Progress and challenges. **Bioresource Technology**, v. 367, n. September 2022, p. 128208, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128208>>.

ZHU, Z.; HAO, M.; ZHANG, N. Influence of contents of chemical compositions on the mechanical property of sisal fibers and sisal fibers reinforced PLA composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 17, n. 1, p. 101–112, 2 jan. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1469452>>.

ZHUANG, J.; LI, M.; PU, Y.; RAGAUSKAS, A. J.; YOO, C. G. applied sciences Observation of Potential Contaminants in Processed Biomass Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. **Applied Sciences**, p. 1–13, 2020.

ZIYA, Y.; SEVEN, S. A. Triblock Superabsorbent Polymer Nanocomposites with Enhanced Water Retention Capacities and Rheological Characteristics. 2022.