

Valorização de resíduos agrícolas via nanocelulose: uma plataforma sustentável para a veiculação de metabólitos secundários na agricultura

Sidney Mariano dos Santos¹, Antonio Carlos Stradioto Melo², Claudia Andrea Lima Cardoso¹

¹*Centro de Estudos em Recursos Naturais (CERNA), Dourados, Brasil
(sidneysantos@uem.br)*

²*Secretaria de Estado de Educação de Mato Grosso do Sul, Deodápolis, Brasil*

Resumo: Esta revisão narrativa analisou a nanocelulose como plataforma biotecnológica na agricultura sustentável. A metodologia consistiu na síntese qualitativa de dados de bases consolidadas. Os resultados destacam que a funcionalização superficial e a alta porosidade da nanocelulose permitem o carregamento eficiente de bioestimulantes e metabólitos. Conclui-se que o material otimiza a germinação e o vigor inicial, promovendo resiliência agrícola via economia circular.

Palavras-chave: Nanocelulose; Bioestimulantes; Agricultura sustentável; Economia circular; Liberação controlada.

INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea enfrenta o duplo desafio de aumentar a produtividade de alimentos, fibras e bioenergia ao mesmo tempo em que reduz de forma drástica a pressão sobre solo, água e biodiversidade. A intensificação baseada em insumos sintéticos de alta solubilidade, mecanização pesada e monocultivos amplia a eficiência produtiva no curto prazo, mas está associada à degradação de solos, contaminação por fertilizantes e pesticidas, emissões de gases de efeito estufa e perda de serviços ecossistêmicos, o que ameaça a segurança alimentar em um cenário de mudanças climáticas e escassez hídrica (Borges, 2021; Tetila et al., 2020; Wahab et al., 2024). Nesse contexto, consolidam-se agendas globais que articulam segurança alimentar, mitigação climática e conservação da biodiversidade, demandando sistemas de produção capazes de utilizar recursos de forma mais eficiente, reduzir desperdícios e reintegrar resíduos na própria cadeia produtiva, em consonância com os princípios da Economia Circular (Ginko; Stroparo; Dall Agnol, 2025). A Bioeconomia Circular insere-se nesse movimento ao propor o aproveitamento integral e de alto valor agregado da biomassa, sobretudo de resíduos agrícolas lignocelulósicos hoje subutilizados ou queimados a céu aberto, convertendo-os em bioprodutos avançados com menor pegada de carbono (Barba; Santos, 2020; Ansari et al., 2024).

A nanotecnologia surge, nesse cenário, como uma plataforma-chave para desenvolver insumos agrícolas de alta performance, capazes de aumentar a eficiência de uso de nutrientes e bioinsumos, reduzir

perdas por lixiviação e volatilização e minimizar impactos ambientais (An et al., 2022; Saraswat et al., 2023; Wahab et al., 2024). Nanomateriais apresentam elevada área superficial específica, possibilidade de engenharia de superfície e controle fino da cinética de liberação, o que permite desenhar sistemas de entrega (*delivery*) mais precisos para fertilizantes, pesticidas e bioestimulantes (An et al., 2022; Saraswat et al., 2023). Entre os nanomateriais de base biológica, a nanocelulose destaca-se por combinar caráter renovável, biodegradabilidade e biocompatibilidade com propriedades mecânicas elevadas, baixa densidade e rica química de superfície (Cheng et al., 2022; Damásio et al., 2025a; Liu et al., 2023). A nanocelulose, sob as formas de celulose nanocristalina (CNC) e celulose nanofibrilada (CNF), pode ser obtida a partir de ampla gama de biomassa lignocelulósica, incluindo resíduos agrícolas, e apresenta alta razão de aspecto, elevado módulo elástico e grande densidade de grupos hidroxila, que podem ser funcionalizados para controlar interações com água, íons, biomoléculas e matrizes poliméricas (Cheng et al., 2022; Babaei-Ghazvini et al., 2023; Ansari et al., 2024). Esses atributos têm impulsionado aplicações em nanocompósitos, hidrogéis superabsorventes, filmes e aerogéis para embalagem, liberação controlada de fármacos e, mais recentemente, sistemas agrícolas de liberação lenta/contínua de nutrientes e proteção de sementes (Damásio et al., 2025b; Channab et al., 2024).

Diante desse panorama, este trabalho tem por objetivo descrever nanocelulose obtida a partir de diferentes resíduos agrícolas lignocelulósicos,



avaliando como as rotas de extração e as estratégias de modificação superficial afetam suas propriedades físico-químicas relevantes para uso como carreadoras de bioestimulantes.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão narrativa da literatura, de natureza qualitativa e caráter descritivo. Esta metodologia permitiu a análise crítica e a síntese do estado da arte sobre a obtenção e aplicação da nanocelulose como plataforma biotecnológica na agricultura sustentável. A coleta de dados foi realizada em bases de dados *Semantic Scholar*, *PubMed*, *Scopus*, e *Web of Science*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A nanocelulose configura-se como um nanomaterial renovável e biodegradável de elevada área superficial, extraído de paredes celulares vegetais ou sintetizado por via microbiana (Ventura-Cruz; Tecante, 2021; Perdana, 2024). Estruturalmente, apresenta dimensões diametrais entre 5 e 100 nm, com cadeias poliméricas organizadas em domínios cristalinos e amorfos (Ilyas et al., 2024). No âmbito da agricultura sustentável, a valorização de resíduos lignocelulósicos para a obtenção deste biopolímero corrobora os princípios da economia circular, transformando subprodutos de baixo valor comercial em insumos de alto desempenho tecnológico (Phanthong et al., 2018; Kamel et al., 2020; Perdana, 2024).

A literatura técnica recente propõe a classificação da nanocelulose em três categorias principais, definidas por suas características estruturais e métodos de produção. Os nanocristais de celulose (CNCs), ou *whiskers*, são partículas em forma de bastão com diâmetro de 3 a 50 nm e comprimento de 100 a 500 nm, produzidos pela remoção das regiões amorfas das fibras através de hidrólise ácida, o que resulta em estruturas altamente cristalinas e propriedades mecânicas excepcionais (Nagarajan et al., 2021; Wang et al., 2024). Segundo García et al. (2016), o índice de cristalinidade dos CNCs varia de 50% a 96%, dependendo da fonte e do método extrativo. Por outro lado, as nanofibras de celulose (CNFs) consistem em fibras longas e flexíveis que contêm regiões tanto cristalinas quanto amorfas, sendo geralmente produzidas por desintegração mecânica para formar redes emaranhadas com alta área superficial (De Aguiar et al., 2020). Embora não seja de origem vegetal, a nanocelulose bacteriana (BNC) também é citada por sua alta pureza e capacidade de retenção de água, sendo produzida via fermentação (Nakagaito; Takagi, 2018; Goswami et al., 2024).

Adicionalmente, a classificação pode ser feita com base na fonte do resíduo, como bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz ou sabugo de milho (Ventura-Cruz; Tecante, 2021), ou ainda pelas modificações superficiais químicas, como a carboxilação e sulfonação, que introduzem novos grupos funcionais ao material (Sharma et al., 2021). A integração com outros materiais também permite a classificação como nanocelulose composta ou híbrida (Nagarajan et al., 2021).

No que tange aos métodos de obtenção, o processo inicia-se obrigatoriamente por pré-tratamentos para a remoção de componentes não celulósicos. O tratamento alcalino com NaOH ou KOH é utilizado para remover lignina e hemicelulose, aumentando a acessibilidade à celulose (Ventura-Cruz; Tecante, 2021), enquanto o branqueamento com clorito de sódio ou peróxido de hidrogênio elimina pigmentos residuais (Nagarajan et al., 2021). Outras técnicas incluem a explosão a vapor para desestruturar a biomassa (García et al., 2016) e o processo organossolve, que utiliza solventes orgânicos para a dissolução da lignina (Phanthong et al., 2018).

Para a extração mecânica das nanofibras (CNFs), a homogeneização a alta pressão destaca-se pela aplicação de forças de cisalhamento intensas, embora demande alto consumo energético (De Aguiar et al., 2020). Métodos como a microfluidização, a moagem (refino ou moagem de bolas) e a ultrassonografia também são empregados para separar as nanofibras através de impacto e cavitação (Nagarajan et al., 2021; Phanthong et al., 2018; Sharma et al., 2021). Uma alternativa de baixo custo reportada na literatura é o uso de liquidificadores adaptados, que tornam a produção de CNFs mais acessível (Nakagaito; Takagi, 2018).

Já os métodos químicos são predominantes para a produção de CNCs, sendo a hidrólise ácida com ácido sulfúrico (60 a 65%) o método mais comum, introduzindo grupos éster de sulfato que garantem estabilidade coloidal ao material (Nagarajan et al., 2021). A oxidação mediada por TEMPO (2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxil) é outra via química relevante, convertendo grupos hidroxila em carboxilatos para facilitar a separação das fibras (Sharma et al., 2021). Abordagens emergentes incluem o uso de líquidos iônicos (García et al., 2016) e solventes eutéticos profundos (DES), considerados solventes verdes por operarem em condições brandas (Ventura-Cruz; Tecante, 2021). Rotas baseadas em solventes eutéticos profundos (DES) para pré-tratamento de biomassas lignocelulósicas permitem recuperar 80–95 % do solvente e reduzir significativamente o potencial de aquecimento global quando comparadas a processos convencionais com ácidos fortes e branqueamento clorado (Putranto et al., 2025; Ilyas et al., 2024). A



hidrólise enzimática, que utiliza celulasas para hidrolisar seletivamente as regiões amorfas, surge como uma alternativa ecológica que opera em pH e temperaturas moderadas (De Aguiar et al., 2020).

A literatura demonstra que a escolha do resíduo agrícola e o método empregado determinam a eficiência do processo. A produção de nanofibras de celulose (CNF) por métodos mecânicos utiliza a estrutura integral do polímero, resultando em um aproveitamento de massa específico. Em resíduos como o bagaço de cana-de-açúcar, observa-se um rendimento para CNF via moagem de bolas e para nanocristais de celulose (CNC) via hidrólise ácida (SOFLA et al., 2016). Comportamento distinto ocorre em resíduos de milho, com rendimentos reportados para a palha e para a casca (SMYTH et al., 2017; XU et al., 2018). Outras fontes, como a casca do fruto do cacau e resíduos da palmeira real, apresentam variações no rendimento de CNC condicionadas às etapas de hidrólise aplicadas (AKINJOKUN et al., 2021; HAFEMANN et al., 2019). Estudos com diversas biomassas lignocelulósicas, incluindo fibras de banana, sisal, sumaúma e abacaxi, corroboram essas tendências de aproveitamento para CNC (DEEPA et al., 2015).

No que tange ao índice de cristalinidade, os CNC exibem níveis de organização estrutural próprios. Essa característica deve-se ao ataque ácido, que atua nas cadeias de celulose desordenadas das regiões amorfas (SOFLA et al., 2016; XU et al., 2013). No bagaço de cana, os nanocristais e as nanofibras apresentam perfis de cristalinidade singulares (SOFLA et al., 2016). Em materiais derivados do milho, o índice de cristalinidade para CNC e para CNF reflete os métodos de obtenção utilizados (SMYTH et al., 2017; XU et al., 2018). Fontes como a palha de abacaxi e o sisal também se destacam na produção de CNC com integridade cristalina definida (DEEPA et al., 2015). A eficiência desses parâmetros é modulada por diversos fatores, desde o teor inicial de celulose na planta até as condições de processamento. Concentrações ácidas elevadas e tempos de reação prolongados tendem a aumentar a cristalinidade dos CNC, porém podem comprometer o rendimento devido à degradação excessiva do polímero. Por outro lado, o uso de pré-tratamentos enzimáticos e o auxílio de ultrassom têm se mostrado estratégias eficazes para otimizar o rendimento sem sacrificar a integridade cristalina (Mishra; Kharkar; Pethe, 2019).

Do ponto de vista técnico e econômico, a escolha entre CNC e CNF envolve um compromisso entre desempenho e aproveitamento de material. Os CNC oferecem maior estabilidade térmica e propriedades mecânicas superiores, sendo ideais para reforço de matrizes, apesar do menor rendimento e do impacto ambiental dos ácidos. As CNF, por sua vez, garantem

melhor utilização da biomassa residual e excelentes propriedades de formação de filme devido à sua rede emaranhada, embora demandem alto consumo energético no processamento mecânico (Sofla et al., 2016; Xu et al., 2013). Em última análise, a seleção da rota de extração deve ser guiada pela aplicação pretendida, visando a valorização de resíduos dentro de uma lógica de bioeconomia sustentável (Mishra; Kharkar; Pethe, 2019).

A caracterização da nanocelulose derivada de plantas exige uma abordagem multifacetada, dada a complexidade de suas dimensões nanométricas, morfologia e propriedades de superfície. Para uma análise morfológica direta, a Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM) destaca-se como uma das técnicas mais utilizadas, permitindo a visualização de dimensões individuais e estados de agregação (Kumar et al., 2021). Devido à baixa densidade de elétrons da celulose, o uso de agentes de contraste como o acetato de uranila é frequente, sendo que avanços recentes sugerem o uso de albumina de soro bovino como agente dispersante para evitar a agregação durante o imageamento (Stinson-Bagby; Roberts; Foster, 2018). Complementarmente, a Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM) possibilita a visualização tridimensional da topografia superficial em filmes e aerogéis, enquanto a Microscopia de Força Atômica (AFM) fornece resolução nanométrica da rugosidade e dimensões sem a necessidade de vácuo ou revestimentos condutivos (Lin; Dufresne, 2014; Onkarappa et al., 2020; Rashad et al., 2025).

Para a análise de tamanho e forma em suspensão, técnicas de espalhamento são fundamentais. O Espalhamento Dinâmico de Luz (DLS) é rotineiramente empregado para determinar o diâmetro hidrodinâmico, embora possa superestimar o comprimento de partículas anisotrópicas (Mao et al., 2017). Por outro lado, o Espalhamento de Raios-X a Baixo Ângulo (SAXS) e o de Nêutrons (SANS) fornecem informações estatísticas precisas sobre as dimensões da seção transversal sem artefatos de secagem (Mao et al., 2017; Rosén et al., 2020; Barrios et al., 2023).

A determinação da área superficial específica é tradicionalmente realizada pela adsorção de nitrogênio (Método BET). Contudo, como essa técnica exige amostras secas (o que pode causar o fenômeno de *hornification* e agregação das fibras) a adsorção de xiloglucana tem surgido como uma alternativa promissora para medir a área acessível em suspensões que nunca foram secas (Moser et al., 2018; Barrios et al., 2023; Perdana, 2024). Adicionalmente, a Cromatografia Gasosa Inversa (IGC) é aplicada para mapear a energia de superfície e as características ácido-base do material (Lin; Dufresne, 2014).



A química de superfície é tipicamente investigada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), que permite identificar grupos hidroxila, carboxila, éster, sulfonato, amida e outros motivos introduzidos por oxidação TEMPO, carboximetilação, esterificação ou enxertia de polímeros (Perdana, 2024; Ilyas et al., 2024; Da Luz et al., 2025). Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (XPS) fornece composição elementar superficial (C, O, N, S, P etc.), estados de oxidação e a fração relativa de diferentes ambientes químicos de carbono (C–C/C–H, C–O, O–C–O, C=O), permitindo quantificar o grau de funcionalização e relacioná-lo com carga superficial e afinidade por bioativos (Perdana, 2024; Rashad et al., 2025). Avanços em nano-IR e técnicas correlativas (AFM-IR) vêm permitindo mapear quimicamente domínios funcionais na escala de dezenas de nanômetros, revelando heterogeneidades de funcionalização dentro de redes fibrilares (Perdana, 2024).

Para a análise de cristalinidade, a Difração de Raios-X (XRD) permanece como a técnica padrão para determinar o índice de cristalinidade e o tamanho do cristal, frequentemente utilizando o método de Segal, apesar do desenvolvimento de métodos mais precisos que consideram contribuições amorfas (Ju et al., 2015). A Ressonância Magnética Nuclear de Estado Sólido (ssNMR) complementa esses dados ao detalhar as formas cristalinas ($I\alpha$ e $I\beta$) e a dinâmica molecular da celulose (Kumar et al., 2021; Da Luz et al., 2025). Por fim, medições reológicas e de potencial zeta fornecem informações indiretas sobre a estabilidade coloidal e interações superficiais, enquanto as análises térmicas (Análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC)) monitoram a estabilidade e o comportamento de decomposição, propriedades intrinsecamente ligadas à área superficial e morfologia (Kumar et al., 2021; Lin; Dufresne, 2014; Da Luz et al., 2025).

Para a construção do sistema de entrega biotecnológico, a integração de bioestimulantes e extratos vegetais à matriz de nanocelulose pode ser realizada por diferentes rotas, que variam desde métodos físicos simples até ligações covalentes complexas. A adsorção física destaca-se como a abordagem mais comum, fundamentada na imersão ou impregnação do nanomaterial em soluções bioativas. Esse método é particularmente eficaz para compostos polifenólicos, com capacidades de adsorção em nanocristais catiônicos (Asante et al., 2019). Adicionalmente, a adsorção eletrostática em derivados funcionalizados (como a nanocelulose oxidada via TEMPO) permite uma carga eficiente de compostos ionizáveis, apresentando uma forte

dependência do pH, que modula a capacidade de retenção (Asante et al., 2019).

Para aplicações que exigem uma retenção mais robusta, o enxerto químico e a formação de ligações covalentes surgem como alternativas viáveis. Processos de esterificação entre as hidroxilas da nanocelulose e os grupos carboxílicos dos bioativos, além de reações de amidação e *click chemistry*, permitem uma ancoragem específica e estável (Galkina et al., 2015; Kumar et al., 2020). Outras estratégias incluem o aprisionamento (*entrapment*) via síntese in situ, encapsulamento baseado em emulsões para extratos hidrofóbicos ou o uso de técnicas de *electrospinning* para a formação de fibras carregadas (Galkina et al., 2015; Zhang et al., 2020; Pang et al., 2019). A formação de compósitos, como hidrogéis e aerogéis porosos, também oferece grandes áreas superficiais para a difusão e liberação controlada de ativos (Hou et al., 2019; Moreau et al., 2016).

Os mecanismos de interação química que sustentam esses sistemas são majoritariamente governados por ligações de hidrogênio. A elevada densidade de grupos hidroxila na superfície da nanocelulose facilita a formação de pontes com grupos fenólicos e carbonílicos presentes nos metabólitos secundários vegetais (Moreau et al., 2016). Interações eletrostáticas, forças de Van der Waals e interações hidrofóbicas também desempenham papéis cruciais, especialmente quando a superfície da nanocelulose é modificada para atrair compostos de diferentes polaridades (Asante et al., 2019; Kumar et al., 2020). Em casos específicos, como no uso de polifenóis, o empilhamento π - π (π - π *stacking*) entre anéis aromáticos e complexos de coordenação mediadores pode fortalecer a adesão do extrato à matriz (Moreau et al., 2016; Galkina et al., 2015; Zhang et al., 2021; Ullah et al., 2022). A eficiência dessa interação e a taxa de carregamento são influenciadas pela química de superfície da nanocelulose, pelas propriedades intrínsecas do bioestimulante (polaridade, tamanho molecular e estado de carga) e pelas condições ambientais. Fatores como o pH do meio e a força iônica podem alterar significativamente a ionização dos grupos funcionais, permitindo o desenvolvimento de sistemas de entrega "inteligentes" que respondem a estímulos ambientais (Asante et al., 2019; Hou et al., 2019). Compreender esses mecanismos é fundamental para otimizar a biodisponibilidade dos insumos e proteger os compostos bioativos contra a degradação prematura no campo.

A interação entre a nanocelulose e os metabólitos secundários vegetais ocorre de forma seletiva, dependendo da classe química do composto e das modificações superficiais da matriz. Os compostos fenólicos, como fenóis, flavonoides e taninos, representam o grupo com maior afinidade por esse



nanomaterial. A superfície rica em hidroxilas da nanocelulose oferece abundantes sítios para ligações de hidrogênio, além de permitir interações hidrofóbicas e empilhamento π - π (Zhang et al., 2021; Ullah et al., 2022; Kasbaji et al., 2023; Szopa; Wróbel; Witek-Krowiak, 2024). Estudos com taninos condensados demonstraram que a adsorção em nanocristais catiônicos segue o modelo de Langmuir (Asante et al., 2019). Essa interação é marcadamente dependente do pH, apresentando variações de até dez vezes na capacidade de carga entre ambientes ácidos e alcalinos (Asante et al., 2019; Szopa; Wróbel; Witek-Krowiak, 2024).

Simulações de dinâmica molecular revelam que catequinas se ligam à celulose seguindo uma cinética de pseudo-segunda ordem que sugere um processo de quimiossorção (Liu et al., 2018). Já os taninos hidrolisáveis, como os ácidos gálico e elágico, montam-se rapidamente nas superfícies das nanofibras, podendo formar nanopartículas ligadas à superfície na presença de íons metálicos multivalentes (Limaye et al., 2019). Para os flavonoides, a adsorção é regida por um equilíbrio entre forças eletrostáticas e hidrofóbicas, sendo fortemente influenciada pelo grau de hidroxilação e conjugação da molécula (Deka; Saikia, 2015). Outras classes, como terpenos e terpenoides, interagem primordialmente por forças de Van der Waals e interações hidrofóbicas, enquanto os alcaloides utilizam seus átomos de nitrogênio para participar de ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas com a matriz funcionalizada (Manyangadze et al., 2020).

A eficiência desse carregamento é modulada pela química de superfície e pelas propriedades físicas da nanocelulose. Embora o material possua uma área superficial específica elevada, a modificação funcional (como a aminação ou sulfatação) é o fator que efetivamente eleva a capacidade de adsorção, mesmo que resulte em uma redução na área superficial total (Manyangadze et al., 2020; Lin; Dufresne, 2014). A estrutura de poros, especialmente a mesoporosidade (2 a 50 nm), facilita a difusão e o acesso dos metabólitos aos sítios internos da matriz. Além disso, a origem da nanocelulose desempenha um papel relevante; por exemplo, a nanocelulose isolada de resíduos de banana tem demonstrado sucesso na imobilização de polifenóis de frutas andinas, mantendo suas propriedades antioxidantes (Alzate-Arbeláez et al., 2019).

Fatores ambientais como temperatura e composição do solvente também regem a termodinâmica do processo, que é tipicamente espontâneo e exotérmico (Alzate-Arbeláez et al., 2019). Estratégias de otimização atual focam na funcionalização direcionada (como o uso de grupos catiônicos para fenóis aniônicos) e no desenvolvimento de compósitos sinérgicos com grafeno ou quitosana para

maximizar a retenção (Manyangadze et al., 2020). A compreensão detalhada dessas interações permite não apenas o carregamento eficiente, mas também o design de sistemas de regeneração e liberação controlada baseados em gatilhos ambientais (Asante et al., 2019; Mahfoudhi; Boufi, 2017).

A funcionalização superficial da nanocelulose é o fator determinante para potencializar sua interação com metabólitos secundários e extratos vegetais, superando as limitações da celulose nativa em termos de capacidade de adsorção e especificidade. Esse aprimoramento ocorre primordialmente pela introdução de novos grupos químicos que complementam a reatividade das hidroxilas naturais. A carboxilação via oxidação TEMPO, por exemplo, insere grupos carboxila (-COOH) capazes de estabelecer ligações iônicas com metabólitos carregados positivamente ou pontes de hidrogênio robustas com fenóis (Khine; Stenzel, 2020). De forma análoga, a aminação introduz grupos amino (-NH₂) que favorecem interações eletrostáticas com compostos ácidos, enquanto a sulfatação eleva a solubilidade em água e cria cargas negativas que ampliam o potencial de interação iônica (Barazzouk; Daneault, 2012; Limaye et al., 2019).

Um avanço significativo proporcionado pela funcionalização é a melhoria das interações hidrofóbicas. Visto que muitos metabólitos, como flavonoides e terpenoides, possuem caráter apolar ou polaridade variável, a modificação da nanocelulose com cadeias alquílicas ou anéis aromáticos cria domínios de afinidade. O enxerto de cadeias alquílicas gera bolsões hidrofóbicos que encapsulam moléculas não polares via forças de Van der Waals, enquanto a introdução de grupos aromáticos permite o empilhamento π - π com polifenóis vegetais (Prakash Menon et al., 2017; Mahfoudhi; Boufi, 2017; Zhang et al., 2021; Ullah et al., 2022). Além disso, a criação de sítios de ligação específicos, como através da impressão molecular ou do uso de ciclodextrinas, permite a formação de complexos de inclusão com dimensões moleculares precisas para substâncias como a quercetina e a curcumina (Guernelli et al., 2020).

A funcionalização também desempenha um papel crucial no controle da porosidade e na estabilidade dos sistemas. A reticulação (*cross-linking*) e a formação de aerogéis criam redes mesoporosas que aprisionam fisicamente os metabólitos, protegendo-os contra a degradação por oxidação ou radiação UV (Raghav; Sharma; Kennedy, 2021). Mais do que apenas um suporte, a nanocelulose funcionalizada atua como um sistema de liberação responsivo; a presença de grupos sensíveis ao pH ou ligações cliváveis por enzimas permite que os bioestimulantes sejam liberados apenas sob gatilhos ambientais específicos (Kumar et al., 2021). Essa engenharia de



superfície transforma a nanocelulose em uma plataforma versátil, capaz de aumentar a biodisponibilidade de metabólitos pouco solúveis e garantir uma entrega direcionada e eficiente no ambiente agrícola.

A cinética de liberação de bioestimulantes encapsulados em matrizes de nanocelulose é um processo dinâmico que apresenta variações significativas conforme o meio, sendo influenciada pela interação entre a matriz, o composto ativo e as condições do entorno. Três mecanismos fundamentais regem esse processo: a liberação controlada por difusão (migração pelos poros da matriz), por inchamento (*swelling*, onde a entrada de água expande a rede e cria caminhos de saída) e por erosão ou degradação da cadeia polimérica (Pang et al., 2019; Hou et al., 2019).

Em ambientes aquosos, a natureza hidrofílica da nanocelulose favorece uma rápida absorção de água, resultando em um inchamento (Ko et al., 2019). Esse fenômeno gera um efeito inicial de *burst release* seguido por uma fase de liberação sustentada (Kolakovic et al., 2012). A cinética nesses casos geralmente se ajusta aos modelos de Higuchi ou Korsmeyer-Peppas, sendo fortemente influenciada pelo pH e pela temperatura (Akhlaghi et al., 2014; Patil et al., 2018).

Por outro lado, no solo, a cinética torna-se muito mais complexa devido a variáveis como textura, umidade, atividade microbiana e presença de matéria orgânica. O efeito inicial de *burst* é em função da menor disponibilidade de água livre e da adsorção do ativo pelas partículas de argila do solo (Pang et al., 2019). A liberação no solo segue padrões bifásicos: uma fase inicial de difusão seguida por uma fase de degradação mediada por enzimas celulasas produzidas por microrganismos (Pang et al., 2019; Guo et al., 2018). Estudos indicam que a taxa de liberação guarda uma correlação direta com o teor de umidade do solo, existindo limiares críticos abaixo dos quais a liberação praticamente cessa (Pang et al., 2019).

Em ambientes controlados de laboratório, os perfis de liberação são mais previsíveis e reproduzíveis, permitindo modelagens matemáticas precisas. Embora esses dados forneçam parâmetros fundamentais de transporte, eles frequentemente diferem das condições de campo, onde a variabilidade climática é a regra (Kolakovic et al., 2012; Akhlaghi et al., 2014).

Para otimizar a performance, modificações específicas na matriz são necessárias: hidrogéis reticulados são ideais para meios aquosos, enquanto derivados responsivos ao pH e à atividade enzimática são mais eficazes para aplicação direta no solo (Hou et al., 2019; Pang et al., 2019). Em suma, o sucesso

da tecnologia depende da sincronização entre a cinética de liberação da nanocelulose e a necessidade hídrica ou nutricional da planta, exigindo um design de matriz que considere as particularidades do ambiente de cultivo (Guo et al., 2018).

O aprimoramento da germinação ocorre por meio de mecanismos interconectados, como a melhoria na absorção e retenção de água, que criam um microambiente rico em umidade ao redor da semente (Zhang et al., 2017). Além disso, a estrutura porosa desses hidrogéis de celulose melhora a difusão de oxigênio, o que é particularmente benéfico para culturas sensíveis à hipóxia, como o gergelim, enquanto matrizes de nanocelulose responsivas ao pH e redox permitem a entrega temporal e espacial precisa de agroquímicos (Zhang et al., 2017; Hou et al., 2019).

Estudos demonstram que hidrogéis aniônicos de celulose com teores adequados de carboxilato aumentam significativamente as taxas de germinação e exibem propriedades antibacterianas que protegem as sementes durante o processo de reprodução (Zhang et al., 2017). De forma semelhante, o uso de nanofibras biopoliméricas de celulose no revestimento promove uma germinação mais rápida e uniforme, especialmente sob condições de estresse por patógenos, como observado em sementes de tomate e alface (Xu et al., 2020).

Além dos parâmetros de germinação, esses sistemas baseados em nanocelulose elevam o vigor inicial das plântulas, melhorando o comprimento radicular, a parte aérea e a biomassa total (Zhang et al., 2017; Xu et al., 2020). A combinação de nutrientes e a proteção física da matriz de nanocelulose permitiram que formulações específicas aumentassem o índice de vigor das plântulas (Amirkhani et al., 2019).

As vantagens tecnológicas incluem a entrega de precisão e a sustentabilidade, por ser a nanocelulose um material derivado de biomassa renovável e totalmente biodegradável (Afzal et al., 2020; Xu et al., 2020). No entanto, é fundamental considerar a segurança ambiental, visto que nanomateriais de celulose podem apresentar efeitos duais, com potencial fitotoxicidade em concentrações elevadas, o que exige a otimização rigorosa das formulações (Szöllösi et al., 2020). De forma geral, a integração da nanocelulose com bioestimulantes oferece uma alternativa ajustável e sustentável aos tratamentos convencionais, desempenhando um papel crucial no estabelecimento de culturas e na resiliência agrícola.

As próximas gerações de sistemas nano-habilitados para agricultura tendem a migrar de formulações passivas de liberação lenta para plataformas de nanocelulose “inteligentes”, capazes de responder de forma multirresponsiva a estímulos simultâneos e típicos da rizosfera, como gradientes de pH, força



iônica, potencial redox e atividade enzimática específica de microrganismos benéficos. A experiência acumulada em sistemas de liberação controlada e “*smart packaging*” baseados em nanocelulose e hidrogéis responsivos demonstra que a incorporação de motivos sensíveis a pH, grupos carregados e domínios supramoleculares dinâmicos permite modular cinéticas de liberação em função do microambiente químico, inclusive com respostas graduais em faixas de pH relevantes para processos biológicos ($\approx 4-8$) (Huo et al., 2022; Wu et al., 2023; Lakhani et al., 2025). A transposição desse conhecimento da área farmacêutica e de embalagens inteligentes para fertilizantes, bioestimulantes e biofortificantes agrícolas abre caminho para nanocelulose funcionalizada (CNC e CNF) que só libere nutrientes ou sinais em presença de assinaturas enzimáticas associadas a raízes ativas ou microbiomas específicos, reduzindo perdas por lixiviação e deriva (Dutta et al., 2022; Channab et al., 2024; Ahmed et al., 2024).

Apesar dos avanços na concepção de materiais, a compreensão da interface nanocelulose-solo ainda é incipiente. Estudos recentes com filmes e compósitos biodegradáveis à base de nanocelulose mostram degradação substancial em solo, aumento de carbono orgânico, respiração e biomassa microbiana, sugerindo um comportamento ambientalmente favorável em escala de semanas a poucos meses (Malekzadeh et al., 2024; Bajestani et al., 2025). No entanto, faltam investigações sistemáticas, em nível molecular, sobre adsorção competitiva de íons, interação com argilas, matéria orgânica dissolvida e exsudatos radiculares, bem como sobre a formação de agregados com colóides minerais e orgânicos ao longo de ciclos de umedecimento e secagem (Solhi et al., 2023; Norizan et al., 2022; Antu et al., 2025). Avaliações de ecotoxicologia em longo prazo, alinhadas a abordagens de avaliação de ciclo de vida (LCA) específicas para nanocelulose agrícola, ainda são raras, embora análises de LCA em outros setores apontem forte potencial de redução de impacto quando a celulose substitui polímeros fósseis, desde que os processos de extração e modificação sigam princípios de química verde e uso de água como meio predominante (Solhi et al., 2023; Norizan et al., 2022; Suvish et al., 2025). A consolidação regulatória de uma “nano-agricultura segura” exige, portanto, matrizes de risco que integrem destino ambiental, toxicidade e desempenho agrônomo (Wahab et al., 2024).

No plano econômico, o principal gargalo reside na transição da produção de nanocelulose em escala laboratorial para rotas industriais compatíveis com a demanda de culturas extensivas, como soja, milho, trigo e cana-de-açúcar. Revisões recentes destacam que o custo de produção e a intensidade energética

dos processos de isolamento e funcionalização continuam sendo os principais limitantes para uso massivo em agricultura, apesar da abundância de resíduos lignocelulósicos disponíveis (Dutta et al., 2022; Norizan et al., 2022; Ahmed et al., 2024; Antu et al., 2025). Nesse contexto, modelos de negócio distintos tendem a emergir para commodities, que exigem custos muito baixos por hectare e incentivam rotas mais simples (CNF pouco funcionalizada, misturas com polímeros biodegradáveis de menor custo, uso de resíduos locais), e para culturas de alto valor agregado (fruticultura, hortaliças especiais, cultivos protegidos), onde formulações de nanocelulose mais sofisticadas (por exemplo, hidrogéis híbridos, compósitos com argilas ou sensores embutidos) podem ser economicamente viáveis devido ao maior valor da produção por área (Lakhani et al., 2025; França et al., 2022; Channab et al., 2024). Estratégias de biorrefinaria e o aproveitamento integrado de fluxos de resíduos (biomassa para energia, lignina para aditivos, nanocelulose para insumos agrícolas) serão centrais para diluir custos de capital e operacionais, como sugerem estudos recentes sobre extração de nanocelulose a partir de biomassas residuais no contexto de economia circular (Suvish et al., 2025; Ahmed et al., 2024).

Outro eixo estratégico é a integração da nanocelulose com sensores de solo, plataformas IoT (*Internet of Things*) e modelos de agricultura 5.0, em que a liberação de nutrientes e bioestimulantes passe a ser monitorada e, idealmente, ajustada em tempo real. A literatura sobre sistemas “*nano-enabled agriculture*” aponta uma convergência entre biopolímeros funcionais e dispositivos de monitoramento, com uso crescente de celulose e nanocelulose como matrizes para biossensores, etiquetas inteligentes e interfaces flexíveis para eletrônica de baixo custo (Solhi et al., 2023; Norizan et al., 2022; Huo et al., 2022). Hidrogéis de nanocelulose e compósitos com alginato ou bentonita já demonstram capacidade de modular umidade, reter nutrientes e, ao mesmo tempo, melhorar propriedades elétricas e estruturais do solo, indicando que esses materiais podem servir como plataformas híbridas para acoplar sensores eletroquímicos, sistemas de reconhecimento (enzimas, peptídeos, aptâmeros) e módulos de comunicação, construindo circuitos materiais que “conversam” com redes IoT agrícolas (Lakhani et al., 2025; Bajestani et al., 2025; Dutta et al., 2022). Em um cenário de agricultura 5.0, a nanocelulose funcionalizada pode atuar tanto como carreadora responsiva de insumos quanto como componente de dispositivos que monitoram, registram e retroalimentam decisões de manejo em plataformas digitais.



Em síntese, a nanocelulose funcionalizada, nas formas de CNC e CNF, consolida-se como principal candidata bio-baseada para substituir polímeros sintéticos em sistemas de liberação controlada de nutrientes, bioestimulantes e agentes de proteção, contribuindo de forma direta para a redução da pegada de carbono no campo. A combinação entre origem renovável, biodegradabilidade, possibilidade de obtenção a partir de resíduos agrícolas e grande versatilidade de funcionalização posiciona a nanocelulose no centro de uma bioeconomia circular aplicada à agricultura (Norizan et al., 2022; Ahmed et al., 2024; Antu et al., 2025). Contudo, a materialização desse potencial em escala de campo dependerá da convergência entre desenho inteligente de sistemas multirresponsivos, entendimento profundo das interações moleculares nanocelulose–solo–biota, rotas industriais energeticamente eficientes e integração com infraestruturas digitais de agricultura 5.0. Se esses desafios forem enfrentados de maneira coordenada, a celulose em escala nano poderá substituir grande parte das matrizes poliméricas fósseis hoje empregadas em insumos agrícolas, viabilizando uma intensificação sustentável com menor emissão de gases de efeito estufa e maior eficiência no uso de recursos.

CONCLUSÃO

Estudos recentes confirmam que a nanocelulose de resíduos agrícolas, obtida via solventes verdes ou mecanoquímica, promove alta sustentabilidade na bioeconomia circular. Avanços em eficiência extrativa e modificação superficial viabilizam o desenvolvimento de plataformas para incorporação de extratos e metabólitos secundários vegetais. Esses sistemas garantem a entrega controlada de bioativos, consolidando a nanocelulose como suporte eficaz para bioestimulantes de alto desempenho. Contudo, persistem lacunas sobre a validação em larga escala, segurança ambiental e dados de impacto agrônomo em campo. Superar tais desafios é essencial para a eficácia desta tecnologia no setor agrícola.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) por meio da Bolsa nº. 83/013.336/2023 (Chamada nº 69/2023, SIAFIC 32928) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código Financeiro 001, para a bolsa de pós-doutorado, e a Rede BioDiversa Centro-Oeste (Projeto CAPES nº 88887.964845/2024-00 e Processo nº 88887.129820/2025-00; e Processo FUNDECT nº. 83/034.923/2024). Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de

pesquisa concedida a C.A.L.C. (Processo nº 306065/2025-8).

REFERÊNCIAS

- AFZAL, I. et al. Modern Seed Technology: Seed Coating Delivery Systems for Enhancing Seed and Crop Performance. *Agriculture*, v. 10, n. 11, p. 526, 2020.
- AHMED, S. et al. Nanocellulose: A novel pathway to sustainable agriculture, environmental protection, and circular bioeconomy. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 264, p. 137979, 2024.
- AKHLAGHI, S. P. et al. Comparative release studies of two cationic model drugs from different cellulose nanocrystal derivatives. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, v. 88, n. 1, p. 207–215, 2014.
- AKINJOKUN, A. I. et al. Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from cocoa pod husk (CPH) biomass wastes. *Heliyon*, v. 7, p. e06680, 2021.
- ALZATE-ARBELÁEZ, A. F. et al. Immobilization of Andean berry (*Vaccinium meridionale*) polyphenols on nanocellulose isolated from banana residues: a natural food additive with antioxidant properties. *Food Chemistry*, v. 294, p. 503–517, 2019.
- AMIRKHANI, M. et al. A Seed Coating Delivery System for Bio-Based Biostimulants to Enhance Plant Growth. *Sustainability*, v. 11, n. 19, p. 5304, 2019.
- AN, C. et al. Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture. *Journal of Nanobiotechnology*, v. 20, p. 1-19, 2022.
- ANSARI, M. et al. Nanocellulose derived from agricultural biowaste by-products: sustainable synthesis, biocompatibility, biomedical applications, and future perspectives: a Review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, v. 8, p. 100529, 2024.
- ANTU, U. et al. Perspective of nanocellulose production, processing, and application in sustainable agriculture and soil fertility enhancement: A potential review. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 286, p. 140570, 2025.
- ASANTE, B. et al. Adsorption of bark derived polyphenols onto functionalized nanocellulose: equilibrium modeling and kinetics. *AIChE Journal*, v. 66, n. 2, 2019.
- BABAEI-GHAZVINI, A. et al. Cellulose nanocrystals in the development of biodegradable materials: A review on CNC resources, modification,



and their hybridization. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 256, p. 128834, 2023.

BAJESTANI, M. et al. Effects of bentonite/sodium alginate/nanocellulose composites on soil properties and their biodegradability over time. *Scientific Reports*, v. 15, 2025.

BARAZZOUK, S.; DANEULT, C. Amino acid and peptide immobilization on oxidized nanocellulose: spectroscopic characterization. *Nanomaterials*, v. 2, n. 2, p. 187–205, 2012.

BARBA, R.; SANTOS, N. A bioeconomia no século XXI: reflexões sobre biotecnologia e sustentabilidade no Brasil. *Revista de Direito, Globalização e Responsabilidade nas Relações de Consumo*, v. 6, n. 2, p. 26-44, 2020.

BORGES, F. F. Certificação ambiental e indicadores de sustentabilidade da agricultura. *Ciência & Tecnologia*, v. 12, n. 1, p. 87–96, 2021.

BARRIOS, N. et al. Innovation in lignocellulosics dewatering and drying for energy sustainability and enhanced utilization of forestry, agriculture, and marine resources – A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 313, p. 102855, 2023.

CHANNAB, B. et al. Nanocellulose: Structure, modification, biodegradation and applications in agriculture as slow/controlled release fertilizer, superabsorbent, and crop protection: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 352, p. 119928, 2024.

CHENG, Z. et al. Comparative study on properties of nanocellulose derived from sustainable biomass resources. *Cellulose*, v. 29, n. 13, p. 7083–7098, 2022.

DA LUZ, M. O. et al. Mechanochemical Treatment of Cellulose: A Strategy for Developing Functional Biocomposite Materials. *Polymer Engineering & Science*, Hoboken, 2025.

DAMÁSIO, R. et al. Nanocelulose: breve revisão da produção a regulamentação. *RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber*, v. 1, n. 2, p. 1-15, 2025a.

DAMÁSIO, R. et al. Nanocompósitos estruturados de CNF utilizando CNC como agente de reforço mecânico. *RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber*, v. 1, n. 2, p. 1-18, 2025b.

DE AGUIAR, J. et al. Enzymatic Deconstruction of Sugarcane Bagasse and Straw to Obtain Cellulose Nanomaterials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 8, p. 2287–2299, 2020.

DEEPA, B. et al. Utilization of various lignocellulosic biomass for the production of

nanocellulose: a comparative study. *Cellulose*, v. 22, p. 1075–1090, 2015.

DEKA, H.; SAIKIA, M. D. Structural and thermodynamic factors on adsorptive interaction of certain flavonoids onto polymeric resins and activated carbon. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 469, p. 51–59, 2015.

DUTTA, S. et al. Biopolymeric Nanocarriers for Nutrient Delivery and Crop Biofortification. *ACS Omega*, v. 7, n. 30, p. 25909–25920, 2022.

FRANÇA, D. et al. Charged-cellulose nanofibrils as a nutrient carrier in biodegradable polymers for enhanced efficiency fertilizers. *Carbohydrate Polymers*, v. 296, p. 119934, 2022.

GALKINA, O. L. et al. Cellulose nanofiber–titania nanocomposites as potential drug delivery systems for dermal applications. *Journal of Materials Chemistry B*, v. 3, n. 8, p. 1688–1698, 2015.

GARCÍA, A. et al. Industrial and crop wastes: A new source for nanocellulose biorefinery. *Industrial Crops and Products*, v. 93, p. 26–38, 2016.

GINKO, M.; STROPARO, E.; DALL AGNOL, L. Desafios, oportunidades e estratégias na implementação da economia circular nas indústrias brasileiras: uma revisão bibliográfica. *Revista Gestão & Sustentabilidade*, v. 7, n. 1, 2025.

GOSWAMI, R. et al. Nanocellulose: A comprehensive review investigating its potential as an innovative material for water remediation. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 254, n. 3, p. 1-18, 2024.

GUERNELLI, S. et al. Nanosponges for the protection and release of the natural phenolic antioxidants quercetin, curcumin and phenethyl caffeate. *Materials Advances*, v. 1, n. 7, p. 2501–2508, 2020.

GUO, H. et al. Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v. 6, p. 77–83, 2018.

HAFEMANN, E. et al. Valorization of royal palm tree agroindustrial waste by isolating cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, v. 218, p. 188–198, 2019.

HOU, X. et al. Controlled release of agrochemicals using pH and redox dual-responsive cellulose nanogels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 67, n. 24, p. 6700–6707, 2019.

HUO, Y. et al. Nanocellulose-Based Composite Materials Used in Drug Delivery Systems. *Polymers*, v. 14, n. 13, p. 2648, 2022.



- ILYAS, R. et al. A review of bio-based nanocellulose epoxy composites. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 12, n. 10, p. 110000-110030, 2024.
- JU, X.; BOWDEN, M.; BROWN, E. E.; ZHANG, X. An improved X-ray diffraction method for cellulose crystallinity measurement. *Carbohydrate Polymers*, v. 123, p. 476–481, 2015.
- KAMEL, R.; EL-WAKIL, N. A.; DUFRESNE, A.; ELKASABGY, N. A. Nanocellulose: From an agricultural waste to a valuable pharmaceutical ingredient. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 163, p. 1579–1590, 2020.
- KASBAJI, M. et al. Bio-based functionalized adsorptive polymers for sustainable water decontamination: A systematic review of challenges and real-world implementation. *Environmental Pollution*, v. 321, p. 121073, 2023.
- KHINE, Y. Y.; STENZEL, M. H. Surface modified cellulose nanomaterials: a source of non-spherical nanoparticles for drug delivery. *Materials Horizons*, v. 7, n. 7, p. 1727–1758, 2020.
- KO, S. W. et al. Analysis of drug release behavior utilizing the swelling characteristics of cellulosic nanofibers. *Polymers*, v. 11, n. 9, p. 1376, 2019.
- KOLAKOVIC, R. et al. Spray-dried nanofibrillar cellulose microparticles for sustained drug release. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 430, n. 1-2, p. 47–55, 2012.
- KUMAR, A. et al. The surface chemistry of a nanocellulose drug carrier unravelled by MAS-DNP. *Chemical Science*, v. 11, n. 15, p. 3868–3877, 2020.
- KUMAR, R. et al. A comprehensive review on production, surface modification and characterization of nanocellulose derived from biomass and its commercial applications. *Express Polymer Letters*, v. 15, p. 104–120, 2021.
- LAKHANI, K. et al. Nanocellulose-hydrogel hybrids: A review on synthesis and applications in agriculture, food packaging and water remediation. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 286, p. 143081, 2025.
- LIN, N.; DUFRESNE, A. Surface chemistry, morphological analysis and properties of cellulose nanocrystals with gradiented sulfation degrees. *Nanoscale*, v. 6, p. 5384–5393, 2014.
- LIMAYE, M. V. et al. Functionalization and patterning of nanocellulose films by surface-bound nanoparticles of hydrolyzable tannins and multivalent metal ions. *Nanoscale*, v. 11, n. 41, p. 19278–19284, 2019.
- LIU, Y. et al. Adsorption of catechin onto cellulose and its mechanism study: kinetic models, characterization and molecular simulation. *Food Research International*, v. 112, p. 225–232, 2018.
- LIU, A. et al. Cellulose nanocrystalline from biomass wastes: An overview of extraction, functionalization and applications in drug delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 239, p. 124557, 2023.
- MAHFOUDHI, N.; BOUFI, S. Nanocellulose as a novel nanostructured adsorbent for environmental remediation: a review. *Cellulose*, v. 24, n. 3, p. 1171–1197, 2017.
- MALEKZADEH, E. et al. Effects of biodegradation of starch-nanocellulose films incorporated with black tea extract on soil quality. *Scientific Reports*, v. 14, 2024.
- MANYANGADZE, M. et al. Enhancing adsorption capacity of nano-adsorbents via surface modification: a review. *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 31, p. 25–32, 2020.
- MAO, Y. et al. Characterization of nanocellulose using small-angle neutron, X-ray, and dynamic light scattering techniques. *The Journal of Physical Chemistry B*, v. 121, p. 1340–1351, 2017.
- MISHRA, S.; KHARKAR, P. S.; PETHE, A. M. Biomass and waste materials as potential sources of nanocellulose: comparative review of preparation methods (2016 – till date). *Carbohydrate Polymers*, v. 207, p. 298–316, 2019.
- MOSER, C. et al. Xyloglucan adsorption for measuring the specific surface area on various never-dried cellulose nanofibers. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, v. 33, p. 186–193, 2018.
- MOREAU, C. et al. Tuning supramolecular interactions of cellulose nanocrystals to design innovative functional materials. *Industrial Crops and Products*, v. 93, p. 96–107, 2016.
- NAGARAJAN, K. J. et al. A comprehensive review on cellulose nanocrystals and cellulose nanofibers: Pretreatment, preparation, and characterization. *Polymer Composites*, v. 42, p. 1588–1630, 2021.
- NAKAGAITO, A. N.; TAKAGI, H. Easy cellulose nanofiber extraction from residue of agricultural crops. *International Journal of Modern Physics B*, v. 32, p. 1840080, 2018.
- NORIZAN, M. et al. Nanocellulose-Based Nanocomposites for Sustainable Applications: A Review. *Nanomaterials*, v. 12, n. 19, p. 3483, 2022.
- ONKARAPPA, H. S. et al. Facile synthesis and characterization of nanocellulose from *Zea mays*



husk. *Polymer Composites*, v. 41, p. 3153–3159, 2020.

PANG, L. et al. Cellulose based materials for controlled release formulations of agrochemicals: a review of modifications and applications. *Journal of Controlled Release*, v. 316, p. 105–115, 2019.

PATIL, M. D. et al. Tuning controlled release behavior of starch granules using nanofibrillated cellulose derived from waste sugarcane bagasse. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 6, n. 7, p. 9208–9217, 2018.

PERDANA, R. Functional Nanocellulose Derivatives for Global Environmental Solutions. *Asian Journal of Environmental Research*, v. 7, n. 4, p. 1-25, 2024.

PHANTHONG, P. et al. Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, v. 1, p. 32–43, 2018.

PRAKASH MENON, M. et al. Extraction and modification of cellulose nanofibers derived from biomass for environmental application. *RSC Advances*, v. 7, n. 68, p. 42750–42773, 2017.

PUTRANTO, A. W. et al. Life cycle assessment of deep eutectic solvent employment for sustainable nanocellulose production from biomass: a systematic review. *Green Chemistry Letters and Reviews*, v. 18, n. 1, 2025.

RAGHAV, N.; SHARMA, M. R.; KENNEDY, J. F. Nanocellulose: a mini-review on types and use in drug delivery systems. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, v. 2, p. 100031, 2021.

RASHAD, A. et al. Effects of Chemical Pretreatments of Wood Cellulose Nanofibrils on Protein Adsorption and Biological Outcomes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 17, p. 9173–9188, 2025.

ROSÉN, T. et al. Cross-sections of nanocellulose from wood analyzed by quantized polydispersity of elementary microfibrils. *ACS Nano*, v. 14, p. 16743–16754, 2020.

SARASWAT, P. et al. Applications of bio-based nanomaterials in environment and agriculture: A review on recent progresses. *Hybrid Advances*, v. 3, p. 100097, 2023.

SHARMA, A. et al. Recent advances in nanocellulose processing, functionalization and applications: a review. *Materials Advances*, v. 2, p. 1872–1895, 2021.

SMYTH, M. et al. Extraction and process analysis of high aspect ratio cellulose nanocrystals from corn (*Zea mays*) agricultural residue. *Industrial Crops and Products*, v. 108, p. 257–266, 2017.

SOFLA, M. R. K. et al. A comparison of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibres extracted from bagasse using acid and ball milling methods. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, v. 7, p. 035004, 2016.

SOLHI, L. et al. Understanding Nanocellulose–Water Interactions: Turning a Detriment into an Asset. *Chemical Reviews*, v. 123, n. 3, p. 1925–2015, 2023.

STINSON-BAGBY, K. L.; ROBERTS, R.; FOSTER, E. J. Effective cellulose nanocrystal imaging using transmission electron microscopy. *Carbohydrate Polymers*, v. 186, p. 429–438, 2018.

SUVISH et al. Nanocellulose Extraction from Biomass Waste: Unlocking Sustainable Pathways for Biomedical Applications. *The Chemical Record*, v. 25, 2025.

SZÖLLÖSI, R. et al. Dual Effect of Nanomaterials on Germination and Seedling Growth: Stimulation vs. Phytotoxicity. *Plants*, v. 9, n. 12, p. 1745, 2020.

SZOPA, D.; WRÓBEL, P.; WITEK-KROWIAK, A. Enhancing polyphenol extraction efficiency: A systematic review on the optimization strategies with natural deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*, v. 392, 123456, 2024.

TETILA, E. et al. Desafios do modelo de desenvolvimento agrícola do estado de Mato Grosso do Sul: uma proposta para o desenvolvimento sustentável. *Interações (Campo Grande)*, v. 21, n. 3, p. 615–632, 2020.

ULLAH, M. W. et al. Editorial: Nanocellulose: A Multipurpose Advanced Functional Material, Volume II. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 931256, 2022.

VENTURA-CRUZ, S.; TECANTE, A. Nanocellulose and microcrystalline cellulose from agricultural waste: Review on isolation and application as reinforcement in polymeric matrices. *Food Hydrocolloids*, v. 118, p. 106771, 2021.

WAHAB, A. et al. Agriculture and environmental management through nanotechnology: Eco-friendly nanomaterial synthesis for soil-plant systems, food safety, and sustainability. *The Science of the Total Environment*, v. 921, p. 171862, 2024.

Wang, X. et al. Research progress of nanocellulose-based food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, v. 143, p. 104289, 2024.

WU, M. et al. Smart antibacterial nanocellulose packaging film based on pH-stimulate responsive microcapsules synthesized by Pickering emulsion template. *Carbohydrate Polymers*, v. 323, p. 121409, 2023.



XU, X. et al. Cellulose nanocrystals vs. cellulose nanofibrils: a comparative study on their microstructures and effects as polymer reinforcing agents. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 5, p. 2999–3009, 2013.

XU, J. et al. Production and characterization of cellulose nanofibril (CNF) from agricultural waste corn stover. *Carbohydrate Polymers*, v. 192, p. 202–207, 2018.

XU, T. et al. Enhancing Agrichemical Delivery and Seedling Development with Biodegradable, Tunable, Biopolymer-Based Nanofiber Seed Coatings. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 8, n. 25, p. 9537–9548, 2020.

ZHANG, H. et al. Cellulose Anionic Hydrogels Based on Cellulose Nanofibers As Natural Stimulants for Seed Germination and Seedling Growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 65, n. 19, p. 3785–3791, 2017.

ZHANG, Q. et al. Methods and applications of nanocellulose loaded with inorganic nanomaterials: a review. *Carbohydrate Polymers*, v. 229, p. 115454, 2020.

ZHANG, D-Y. et al. Preparation of modified cellulose microspheres and application of fast enrichment of chlorogenic acid from mulberry leaf extract. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 15, p. 911-923, 2021.