ReGeo
ISSN: 2177-3246

# O USO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA ÁREA TÊXTIL: UM DESTAQUE PARA A APLICAÇÃO DA NANOLIGNINA

# THE USE OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE IN THE TEXTILE SECTOR: EMPHASIS ON THE APPLICATION OF NANOLIGNIN

# EL USO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN EL SECTOR TEXTIL: ÉNFASIS EN LA APLICACIÓN DE NANOLIGNINA

10.56238/revgeov17n3-096

**Larissa Martins Mattos Dias**
Mestra
Instituição: Escola de Artes, Ciências e Humanidades - Universidade de São Paulo (EACH/USP USP)
E-mail: larissammdias@gmail.com
Lattes: http://lattes.cnpq.br/5163191214669725
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2469-8872

**Silgia Aparecida da Costa**
Doutora
Instituição: Escola de Artes, Ciências e Humanidades - Universidade de São Paulo (EACH/USP)
E-mail: silgia@usp.br
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8121489511788009
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8331-538X

**Valdeir Arantes**
Doutor
Instituição: Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo (EEL/USP)
E-mail: valdeir.arantes@usp.br
Lattes: http://lattes.cnpq.br/7055319552228541
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9565-1006

**Sirlene Maria da Costa**
Doutora
Instituição: Escola de Artes, Ciências e Humanidades - Universidade de São Paulo (EACH/USP)
E-mail: sirlene@usp.br
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3653275277718256
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0522-0611

**RESUMO**
A indústria têxtil tem evoluído em resposta às crescentes demandas por inovação tecnológica e sustentabilidade, destacando-se a nanotecnologia e a valorização de resíduos agroindustriais como estratégias promissoras. Neste contexto, o presente artigo apresenta uma revisão da literatura sobre a aplicação da lignina e, especialmente, da nanolignina no setor têxtil, com foco em estudos publicados

nos últimos cinco anos. A metodologia baseou-se no levantamento e análise crítica de trabalhos acadêmicos disponíveis em plataformas de periódicos científicos, os quais foram sistematizados de forma comparativa. Os resultados demonstram que, embora a lignina seja amplamente estudada em diferentes áreas, sua aplicação na forma de nanopartículas em materiais têxteis ainda é subexplorada, configurando uma lacuna relevante na literatura. Contudo, os estudos analisados indicam o potencial da nanolignina para conferir propriedades funcionais aos têxteis, como proteção UV, atividade antioxidante e possíveis efeitos antimicrobianos, além de contribuir para a redução do uso de matérias-prima sintéticas de origem fóssil. Conclui-se que a nanolignina representa uma alternativa promissora para soluções têxteis sustentáveis.

**Palavras-chave:** Resíduos Agroindustriais. Nanotecnologia. Lignina. Sustentabilidade.

**ABSTRACT**

The textile industry has evolved in response to increasing demands for technological innovation and sustainability, with nanotechnology and the valorization of agro-industrial residues standing out as promising strategies. In this context, this article presents a literature review on the application of lignin and, especially, nanolignin in the textile sector, focusing on studies published over the past five years. The methodology was based on the survey and critical analysis of academic works available on scientific journal platforms, which were systematized comparatively. The results show that although lignin has been widely studied in different fields, its application in the form of nanoparticles in textile materials remains underexplored, representing a significant gap in the literature. However, the analyzed studies indicate the potential of nanolignin to impart functional properties to textiles, such as UV protection, antioxidant activity, and possible antimicrobial effects, in addition to contributing to the reduction of synthetic fossil-based raw materials. It is concluded that nanolignin represents a promising alternative for sustainable textile solutions.

**Keywords:** Agro-Industrial Residues. Nanotechnology. Lignin. Sustainability.

**RESUMEN**

La industria textil ha evolucionado en respuesta a las crecientes demandas de innovación tecnológica y sostenibilidad, destacándose la nanotecnología y la valorización de residuos agroindustriales como estrategias prometedoras. En este contexto, el presente artículo presenta una revisión de la literatura sobre la aplicación de la lignina y, especialmente, de la nanolignina en el sector textil, con enfoque en estudios publicados en los últimos cinco años. La metodología se basó en el levantamiento y análisis crítico de trabajos académicos disponibles en plataformas de revistas científicas, los cuales fueron sistematizados de forma comparativa. Los resultados demuestran que, aunque la lignina es ampliamente estudiada en diferentes áreas, su aplicación en forma de nanopartículas en materiales textiles aún está poco explorada, configurando una brecha relevante en la literatura. No obstante, los estudios analizados indican el potencial de la nanolignina para conferir propiedades funcionales a los textiles, como protección UV, actividad antioxidante y posibles efectos antimicrobianos, además de contribuir a la reducción del uso de materias primas sintéticas de origen fósil. Se concluye que la nanolignina representa una alternativa prometedora para soluciones textiles sostenibles.

**Palabras clave:** Residuos Agroindustriales. Nanotecnología. Lignina. Sostenibilidad.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, a indústria têxtil vem se desenvolvendo e inovando, deixando de exercer apenas sua função tradicional para incorporar tecnologias e materiais de última geração. No Brasil, o setor é responsável por cerca de 8 milhões de empregos diretos e indiretos e registrou um faturamento de R$ 204 bilhões em 2023 (ABIT, 2025). Dentro desse contexto, o mercado de têxteis tecnológicos também tem procurado impulsionar o crescimento da indústria ao promover práticas mais sustentáveis e processos produtivos inovadores. Por meio de tecnologias que conferem propriedades como repelência à água, ação antimicrobiana, controle térmico e proteção UV, entre outras, a aplicação desses materiais se estende a diversas áreas, incluindo vestimentas hospitalares, uniformes, curativos, roupas esportivas e casuais (Boruah e Jose, 2025).

A obtenção dessas propriedades está diretamente relacionada ao emprego de diferentes tecnologias que podem ser incorporadas desde a etapa de fiação até os processos de beneficiamento. Entre as alternativas mais promissoras destaca-se a nanotecnologia, que utiliza partículas com dimensões entre 1 e 100 nanômetros (nm), capazes de conferir características únicas a materiais que, em escala convencional, não apresentariam o mesmo desempenho (Camargos *et al*., 2025). Dentre os nanomateriais, as nanopartículas se sobressaem pela ampla gama de funcionalidades e aplicações possíveis.

Historicamente, o uso de nanopartículas tem sido associado a compostos sintéticos, como prata, chumbo e ouro, amplamente empregados devido à sua eficácia (Boruah e Jose, 2025). Contudo, em um cenário global cada vez mais atento à origem da matéria-prima e aos impactos ambientais dos processos produtivos, cresce a demanda por alternativas mais verdes e sustentáveis. Nesse sentido, a substituição de compostos sintéticos por nanopartículas obtidas a partir do reaproveitamento de resíduos agroindustriais representa uma oportunidade alinhada aos princípios da economia circular, agregando valor a materiais residuais e reduzindo impactos ambientais.

O Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de diversas culturas, como soja, café e cana-de-açúcar (CONAB, 2025). A expressiva escala de produção dessas culturas, resulta em grandes volumes de resíduos, transformando o reaproveitamento desses materiais em uma oportunidade estratégica. Em um cenário de crescente dependência de matérias-primas não renováveis, a adoção de processos e produtos sustentáveis torna-se uma necessidade urgente. Nesse contexto, o uso crescente de biomassas e a valorização de resíduos agroindustriais podem contribuir de forma significativa para o fornecimento de insumos a diferentes setores industriais, ao mesmo tempo em que reduzem o desperdício e mitigam impactos ambientais, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (ONU, 2025).

A biomassa lignocelulósica caracteriza-se pela composição principal de celulose, hemicelulose e lignina, além de extrativos e cinzas, podendo ser de origem agrícola ou florestal. Entre os três

componentes macromoleculares, a lignina tem gerado crescente interesse científico, com suas propriedades e potenciais aplicações sendo amplamente investigadas. Dentre os produtos mais estudados oriundos da lignina estão os polímeros, a fibra de carbono e as nanopartículas (Braga *et al*., 2023). A principal oportunidade para a valorização deste biopolímero reside no reaproveitamento estratégico de resíduos e coprodutos oriundos da agroindústria.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe explorar o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, com foco na lignina, dada sua ampla disponibilidade e suas propriedades únicas em escala nanométrica. Tais características permitem o desenvolvimento de produtos têxteis com maior valor agregado, incorporando apelo sustentável e potencial inovador

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa descritiva de natureza teórica, conduzida por meio de uma revisão bibliográfica fundamentada na análise temática. O escopo do levantamento abrangeu o reaproveitamento da lignina sob a forma de nanopartículas, com ênfase em suas propriedades, limitações e aplicações no setor têxtil. A coleta de dados foi realizada nas bases de dados ScienceDirect e SciELO, utilizando-se os termos: 'nanolignin', 'lignin nanoparticles', 'sustainability' e 'agroindustrial waste'. O critério de inclusão restringiu-se a artigos de periódicos com fator de impacto, publicados majoritariamente por editoras como a Elsevier no último quinquênio, além de documentos técnicos provenientes de órgãos oficiais pertinentes à temática.

## 3 REFERENCIAL TEÓRICO

A expansão da indústria têxtil e a evolução dos fluxos de investimento nas últimas décadas refletem a transição para um modelo produtivo pautado pela eficiência tecnológica e responsabilidade socioambiental. Em 2023, o aporte financeiro no setor totalizou R$ 4,6 bilhões, sustentando um parque industrial de 25,3 mil empresas. Este setor produtivo destaca-se pelo forte impacto social, com a mão de obra feminina representando 60% do contingente ocupado, e uma produção anual de 8,02 bilhões de peças, abrangendo desde artigos de consumo doméstico até têxteis técnicos de alto desempenho (ABIT, 2025).

Apesar da importância econômica da indústria têxtil, o setor precisa adotar práticas mais inovadoras e ecológicas. Isso se deve ao fato de que várias etapas da produção ainda causam sérios impactos ambientais, como o tingimento, que consome muita água e gera poluição. Para tornar esse processo mais sustentável, existem dois caminhos principais: investir no tratamento dos resíduos após a produção ou agir diretamente na origem, utilizando matérias-primas sustentáveis desde o início da criação dos produtos.

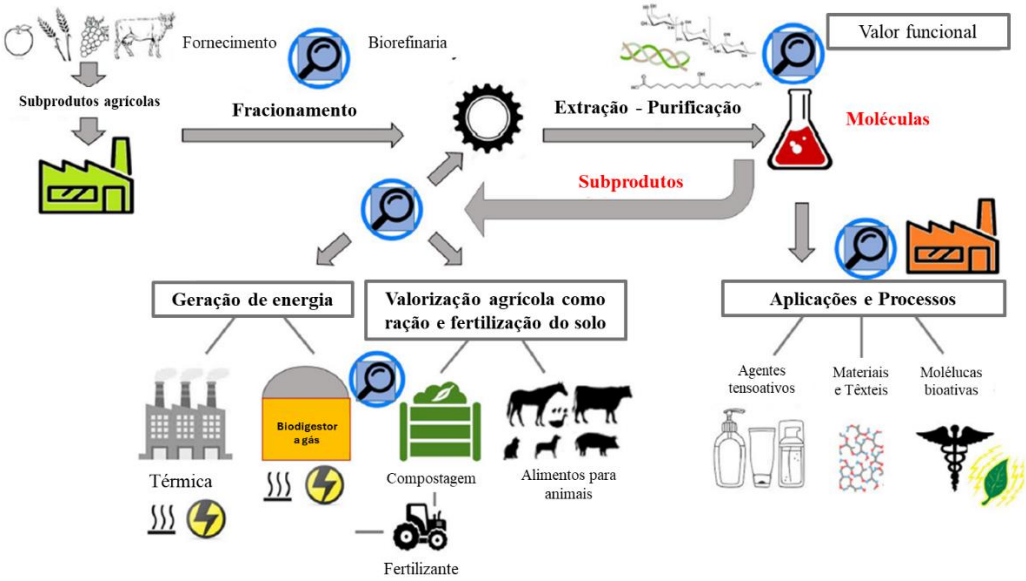
A aplicação da nanotecnologia em substratos têxteis tem se consolidado como uma estratégia promissora para a melhoria do desempenho funcional, aliada à incorporação de atributos sustentáveis, os quais podem contribuir para o aumento da durabilidade e do ciclo de vida dos produtos. Nesse contexto, a nanotecnologia destaca-se como uma tecnologia de transformação para o setor têxtil. Estimativas recentes indicam que o mercado *global* de nanotecnologia aplicada aos têxteis foi avaliado em aproximadamente US$ 5,8 bilhões em 2021, com projeção de crescimento para US$ 16 bilhões até 2030 (GMI, 2025). Destaca-se que as nanopartículas de prata, empregadas com a finalidade de conferir propriedades antibacterianas, representam cerca de 65% dos nanomateriais utilizados para esse fim na indústria têxtil, evidenciando uma tendência predominante e, simultaneamente, suscitando preocupações crescentes quanto aos potenciais efeitos tóxicos associados à sua utilização. Isso porque o comportamento biológico dessas novas estruturas, com tamanho e área de superfície diferentes do original, ainda é considerado imprevisível (Chutturi *et al*., 2025). Sendo assim, uma abordagem com nanopartículas oriundas de materiais de fontes renováveis, é uma alternativa benéfica ao meio ambiente e à segurança dos produtos.

Este é um tópico abordado na ODS 12, que tem entre seus objetivos o “Consumo e Produção Responsáveis”. Esse objetivo estabelece metas a serem alcançadas até 2030, visando à gestão sustentável dos recursos naturais e à redução do desperdício de alimentos ao longo das cadeias produtivas. Além disso, busca melhorar o controle dos resíduos lançados na natureza e minimizar sua geração por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso (ONU, 2025).

Esse objetivo também está alinhado com um importante conceito que é o da bioeconomia circular, que é definido pela produção ambientalmente sustentável e economicamente viável, a partir de uma análise conjunta de todos os possíveis impactos: sociais, ambientais e econômicos (Rajesh Banu *et al*., 2021).

A biomassa lignocelulósica tem despertado crescente interesse acadêmico devido à sua abundância e versatilidade, sendo essencial na produção de biocombustíveis e outros bioprodutos. Nesse cenário, a bioeconomia circular propõe uma nova abordagem para o tratamento de resíduos, transformando o que antes era desperdício em oportunidades estratégicas e insumos de alto valor (Bakan *et al*., 2021), como mostra a Figura 1.

Figura 1. Oportunidades de reaproveitamento de subprodutos agrícolas




Fonte: Adaptado de Bakan *et al*., 2021.

Globalmente, a geração de resíduos do processamento agrícola alcança cerca de 140 gigatoneladas por ano, sendo o Brasil, China, Estados Unidos e Índia os maiores produtores (EMBRAPA, 2025; FAO, 2025). Tais resíduos são materiais lignocelulósicos constituídos, essencialmente, por celulose, hemicelulose e lignina (Ijaz, 2020). No Brasil, as fontes de lignina mais expressivas são o eucalipto, proveniente do processo Kraft na indústria de celulose, e o bagaço da cana-de-açúcar, principal coproduto das usinas de etanol de segunda geração (Braga *et al*., 2023).

A lignina tem sido estudada como matéria-prima para a produção de fibra de carbono, apresentando-se como uma alternativa viável a materiais de custo elevado e maior impacto ambiental. Composta basicamente por unidades de p-hidroxifenil/cumaril (H), de guaiacil (G) e siringil (S) (Fengel e Wegener, 1984), é um biomaterial complexo que desempenha um papel essencial no fortalecimento mecânico e no transporte de águas e minerais nas plantas (Chitturi *et al*., 2025).

Em estudo recente, foram preparadas onze soluções de lignina pura e quatro associações com álcool polivinrílico (PVA), utilizando etileno glicol como plastificante. Foram avaliados os métodois de eletrofiação e extrusão por fusão para a obtenção das fibras têxteis. A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) confirmou que as soluções submetidas à eletrofiação resultaram em fibras com diâmetros entre 0,21µm e 2,38µm. Adicionalmente, o método por fusão também demonstrou resultados satisfatórios na formação do material (Seçkin e Üçgül, 2020)

Um atributo promissor da lignina é sua atividade antibacteriana. Ferreira *et al*. (2025) investigaram a eficácia da lignina proveniente do processo Kraft como agente antimicrobiano em substratos de algodão e poliéster. Foram avaliadas concentrações entre 0% e 30% (m/v), as quais conferiram caráter hidrofóbico aos tecidos, com ângulo de contato atingindo 112,6°. Além disso, a

aplicação de 10% de lignina em tecidos de algodão demonstrou uma eficácia superior a 96% contra a bactéria *S. aureus*.

Essas funcionalidades tornam a lignina uma matéria-prima promissora para a síntese de nanopartículas sustentáveis em substituição a insumos sintéticos. Ali *et al*. (2024) investigaram a nanolignina obtida por ultrassom a partir de resíduos de algodão egípcio (Giza 86 e 90) para aplicação em têxteis médicos. Os resultados evidenciaram uma elevada capacidade antioxidante, além de atividade antimicrobiana contra sete linhagens bacterianas patogênicas e cinco fungos micotoxigênicos. O estudo concluiu que essas nanopartículas possuem alto potencial para o desenvolvimento de materiais clínicos descartáveis.

Na indústria têxtil, destacam-se aplicações como agente antimicrobiano, relacionado aos grupos fenólicos da lignina (Juikar e Nadanathangam, 2020), retardante a chamas, possivelmente oriunda da estrutura aromática que favorece a formação de *char* (Petkvoska *et al*., 2022) e como uma barreira contra radiação ultravioleta devido à abundância dos grupos cromóforos, como os fenólicos conjugados, cetonas, e ligações de hidrogênio presentes na estrutura intramolecular (Deus *et al*., 2022). Apesar dos benefícios da lignina, sua aplicação direta enfrenta desafios significativos devido à sua estrutura molecular complexa e às dificuldades em processos de separação e filtração. Nesse cenário, o avanço da nanotecnologia permite converter a lignina em nanopartículas homogêneas, facilitando seu manuseio e potencializando suas propriedades.

## 4 RESULTADOS

A indústria têxtil constitui um dos setores mais tradicionais e consolidados da economia global. O contínuo avanço tecnológico e a expansão de sua aplicabilidade para segmentos estratégicos, como os setores automotivo, de construção civil, embalagens e saúde, revelam uma indústria que transcende o vestuário convencional, priorizando alta performance e funcionalidade. Ao convergir inovação tecnológica e diretrizes de sustentabilidade, o setor demonstra maturidade para o desenvolvimento de materiais de elevado valor agregado, caracterizados pela renovabilidade e pela baixa toxicidade. Nesse cenário, os resíduos agroindustriais emergem como precursores ideais, conferindo caráter inovador aos têxteis por meio da valorização da biomassa lignocelulósica e, primordialmente, da lignina.

Sob a perspectiva da sustentabilidade e da economia circular, a comparação entre a lignina em sua forma original e na forma de nanopartículas evidencia avanços relevantes para aplicações têxteis. A lignina em escala macroscópica, apesar de ser um subproduto abundante e apresentar caráter renovável e biodegradável, possui limitações relacionadas à sua baixa reatividade, heterogeneidade estrutural e reduzida eficiência funcional quando aplicada diretamente aos substratos têxteis. A conversão da lignina em nanopartículas, por sua vez, favorece o aumento da área superficial específica

e a intensificação das interações com as fibras, resultando em melhor dispersão e maior eficiência na funcionalização têxtil (Marotti e Arantes, 2022; Brenelli *et al*., 2021).

Os resultados indicam que essa abordagem potencializa propriedades de interesse sustentável, como atividade antioxidante, proteção contra radiação ultravioleta e possível ação antimicrobiana, contribuindo para a redução do uso de aditivos sintéticos de origem fóssil. Além disso, a valorização de resíduos industriais por meio da produção de nanopartículas de lignina está alinhada aos princípios da economia circular, ao promover o reaproveitamento de biomateriais e o desenvolvimento de produtos têxteis com maior valor agregado e menor impacto ambiental. Dessa forma, a aplicação de nanopartículas de lignina representa uma estratégia promissora para integrar desempenho funcional e sustentabilidade no setor têxtil.

O Quadro 1 apresenta uma síntese dos estudos selecionados nesta pesquisa, com ênfase nos diferentes substratos têxteis e nas metodologias adotadas pelos autores. O levantamento restringiu-se ao recorte temporal dos últimos cinco anos.

Quadro 1. Pesquisas realizadas com nanolignina em diferentes substratos têxteis.

| **Substrato têxtil** | **Descrição** | **Referência** |
|---|---|---|
| Algodão | Nanocelulose e nanolignina foram combinadas ao glicerol e ao silicone para o desenvolvimento de um revestimento têxtil funcional e sustentável. Ao avaliar as propriedades mecânicas, a molhabilidade e a colorimetria, os resultados indicaram um material promissor, que integra com sucesso matrizes sintéticas e componentes orgânicos. | Zakaluk *et al*., 2025 |
| Lã<br>Algodão<br>Acrílico<br>Acetato<br>Poliamida | Dispersões coloidais de nanopartículas de lignina, extraídas do bagaço da cana-de-açúcar, foram desenvolvidas e caracterizadas para aplicação como corantes naturais em substratos têxteis sintéticos e naturais. Além da coloração obtida, os tecidos tingidos apresentaram propriedades de retardância a chamas, agregando valor funcional ao matéria. | Pereira *et al*., 2025 |
| Máscara descartável (TNT – 100% polipropileno) | Avaliou-se o potencial antibacteriano de um nanocompósito à base de lignina e cobre, aplicado em substratos têxteis por meio da técnica de esgotamento (imersão). O material resultante exibiu notável dispersibilidade em meio aquoso e uma eficaz ação antimicrobiana. Além disso, os ensaios de citotoxicidade confirmaram a biocompatibilidade do composto, sugerindo sua viabilidade para aplicações em contato com a pele. | Chen *et al*., 2025 |
| Gaze médica (100% algodão) | Nanolignina extraída do algodão egípcio foi estudada como agente antioxidante e antibacteriano em têxteis médicos. Como resultado obtiveram um material com ação antibacteriana contra sete bactérias patogênicas e cinco fungos micotoxigênicos. | Ali *et al*., 2024 |
| Algodão<br>Linho | Lignina extraída pelo processo Kraft dos talos do algodão foi transformada em nanolignina por hidrólise microbiana com *Aspergillus oryzae*. As nanopartículas foram aplicadas em tecidos de algodão e linho e conferiram 100% de ação antibacteriana (*S. aureus* e *K. pneumoniae*), além de ação antioxidante e proteção UV. | Juikar e Nadanathangam, 2020 |

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise dos resultados evidencia que, apesar do crescente interesse por nanopartículas de lignina em diferentes áreas do conhecimento, sua aplicação no setor têxtil ainda é pouco explorada na literatura científica. Essa lacuna se refletiu no número limitado de estudos disponíveis para comparação direta, o que, longe de representar uma limitação, reforça o caráter inovador da presente investigação. Os resultados obtidos demonstram o potencial das nanopartículas de lignina como alternativa sustentável para aplicações têxteis, indicando propriedades promissoras que justificam sua incorporação em processos e materiais do setor. Nesse contexto, o presente estudo contribui para a ampliação do conhecimento interdisciplinar, ao estabelecer bases iniciais para futuras pesquisas que possam aprofundar a compreensão dos mecanismos envolvidos, otimizar métodos de aplicação e avaliar o desempenho em escala industrial. Assim, os achados apresentados não apenas preenchem uma lacuna existente, mas também abrem novas perspectivas para o desenvolvimento de soluções têxteis mais sustentáveis e alinhadas às demandas ambientais atuais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a expansão da indústria têxtil e a relevância da agroindústria global, unir sustentabilidade e funcionalidade tornou-se um caminho indispensável. Nesse contexto, a nanolignina ganha destaque por sua versatilidade; suas aplicações, tanto as já conhecidas quanto as que ainda estão por vir, sinalizam uma verdadeira mudança de paradigma para o setor. Faz-se necessário aprofundar as pesquisas para melhor compreensão de questões como biossegurança e toxicidade, além da aprimoração dos métodos de extração e possíveis otimizações do processo.

Este artigo de revisão apresentou uma análise da evolução da indústria têxtil frente às exigências atuais por inovação, desempenho funcional e sustentabilidade, com destaque para a incorporação da nanotecnologia e o reaproveitamento de resíduos agroindustriais como estratégias socioeconômicas e ambientais. A partir da biomassa lignocelulósica, a lignina e, em especial, a nanolignina foram discutidas como materiais promissores para aplicações têxteis, considerando suas propriedades funcionais e seu alinhamento aos princípios da economia circular. O levantamento e a sistematização dos estudos publicados nos últimos cinco anos, evidenciaram que a aplicação da nanolignina no setor têxtil ainda está em estágio inicial, com número limitado de estudos disponíveis. Esse fato reforça a relevância desta revisão ao identificar lacunas de conhecimento e indicar tendências e desafios que podem orientar futuras pesquisas, especialmente no que se refere à padronização de métodos, avaliação de desempenho, escalonamento industrial e impactos ambientais. Assim, este trabalho contribui como base teórica e analítica para o avanço de soluções têxteis sustentáveis e tecnologicamente inovadoras.

**AGRADECIMENTOS**

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp)- Projeto 2023/15419-9.

## REFERÊNCIAS

ABIT. **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção**. Disponível em: < https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 04 dez. 2025.

ALI, M. *et al.* Eco-friendly lignin nanoparticles as antioxidant and antimicrobial material for enhanced textile production. **Nature *Sci Rep***, v. 14, 2024, 17470. https://doi.org/10.1038/s41598-024-67449-0

BAKAN, B. *et al*. Circular Economy Applied to Organic Residues and Wastewater: Research Challenges. **Waste Biomass Valor**, v. 13, 1267–1276, 2022. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01549-0

BORUAH, S; JOSE, S. Nanotechnology in textiles: Environmental safety and sustainable practices. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 23, 101062, 2025. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2025.101062.

BRAGA, M. *et al*. O potencial da lignina no contexto brasileiro: um diagnóstico de especialistas brasileiros sobre tecnologias e tendências para 2030. **O Papel**, v. 84, n. 7, 87-97, 2023. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1155859/1/O-potencial-da-lignina.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2026.

BRENELLI, L. *et al*. Modified lignin from sugarcane bagasse as an emulsifier in oil-in-water nanoemulsions. **Industrial Crops and Products**, v. 167, 2021, 113532. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113532.

CAMARGOS, C. *et al*. Lignin and Nanolignin: Next-Generation Sustainable Materials for Water Treatment. **ACS Applied Bio Materials**, v. 8, n. 4, 2632-2673, 2025. https://doi.org/10.1021/acsabm.4c01563.

CHEN, M. *et al*. Lignin and copper nanocomposite coating for antibacterial mask. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 291, 2025, 139149. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.139149.

CHUTTURI, M. *et al*. Exploring nanolignin as a sustainable biomacromolecule in polymer composites: Synthesis, characterization, and applications: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 304, 2025, 140881. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140881.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-estimativa-de-evolucao-graos.html>. Acesso em: 04 dez. 2025.

DEUS, D. A. de *et al*. Lignina: uma importante tecnologia química da madeira. **E-Acadêmica**, *[S. l.]*, v. 3, n. 3, p. e7233391, 2022. DOI: 10.52076/eacad-v3i3.391. Disponível em: https://eacademica.org/eacademica/article/view/391. Acesso em: 19 fev. 2026.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível: < https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos>. Acesso em: 03 set. 2025.

FAO. **Food and agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: https://www.fao.org/statistics/en. Acesso em: 18 dez. 2025.

FENGEL, D; WEGENER, G. (1984). **Wood, chemistry, ultrastructure, reactions**. Walter de Gruyter, Berlin, 613p.

FERREIRA, S. *et al*. Lignin-Based Coatings: A Sustainable Approach to Produce Antibacterial Textiles. **Int. J. Mol. Sci**. 2025, 26, 1217. https://doi.org/10.3390/ijms26031217

GMI. **Global Market Insights**. Disponível em: < https://www.gminsights.com/industry-analysis/smart-and-interactive-textiles-market>. Acesso em: 18 jan. 2025.

IJAZ, M. Evaluation of antimicrobial activity of Ocimum tenuiflorum leaves on mechanical behavior of fabrics. **Pure and Applied Biology**, v. 9, n. 1, 10 mar. 2020.

JUIKAR, S.J., NADANATHANGAM, V. Microbial Production of Nanolignin from Cotton Stalks and Its Application onto Cotton and Linen Fabrics for Multifunctional Properties. **Waste Biomass Valor**, 11, 6073–6083 (2020). https://doi.org/10.1007/s12649-019-00867-8

MAROTTI, B. D. S.; ARANTES, V. Ultra-refining for the production of long-term highly pH-stable lignin nanoparticles in high yield with high uniformity. **Green Chemistry**, v. 24, n. 3, p. 1238–1258, 7 fev. 2022.

ONU. **Nações Unidas Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs >. Acesso em: 18 dez. 2025.

PEREIRA, P. *et al*. Efficient production of lignin nanoparticle colloids and their feasibility for eco-friendly dyeing of natural and synthetic textile fabrics. **Industrial Crops and Products**, v. 225, 2025. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120390.

PETKOVSKA, J. *et al*. Flame-Retardant, Antimicrobial, and UV-Protective Lignin-Based Multilayer Nanocoating. **ACS Applied Polymer Materials**, 4528-4537, 2022. https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00520.

RAJESH BANU, J. *et al*. Lignocellulosic biomass based biorefinery: A successful platform towards circular bioeconomy. **Fuel**, v. 302, 15 out. 2021.

SEÇKIN, Mine; ÜÇGÜL, İbrahim. Investigation of Lignin as a Textile Fiber. **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,** v. 16, 183-190. 2020. https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.670652.

ZAKALUK, I. *et al* . Functional finishes on textile fabrics: The potential of nanostructures of cellulose and lignin. **Maderas, Cienc. tecnol.**, Concepción , v. 27, 43, 2025 . https://dx.doi.org/10.22320/s0718221x/2025.43.