

RETARDANTES DE LLAMA VERDES A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE NANOLIGNINA Y NANOCELULOSA

Ciencia, Tecnología y
Biología

GREEN FLAME RETARDANTS FROM AGRO-INDUSTRIAL WASTE: DEVELOPMENT AND APPLICATION OF NANOLIGNIN AND NANOCELLULOSE

RESUMEN

La búsqueda de retardantes de llama sostenibles ha impulsado el desarrollo de materiales basados en lignina y celulosa, dos biopolímeros abundantes en la biomasa lignocelulósica. La industria agroalimentaria genera grandes volúmenes de residuos, como bagazo de caña y cáscara de nuez, ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina, que constituyen una fuente renovable para producir nanomateriales funcionales. La nanolignina y la nanocelulosa poseen propiedades estructurales y térmicas que favorecen la formación de capas carbonosas, la reducción de humos y la mejora de la estabilidad térmica en polímeros y textiles. Esta revisión analiza el estado del arte sobre técnicas de extracción e hidrólisis, métodos de obtención de nanopartículas lignocelulósicas, mecanismos de acción como retardantes de llama, y aplicaciones actuales en recubrimientos, biocomposites y materiales funcionales. También se discuten las ventajas ambientales, los sinergismos con compuestos nitrogenados y fosforados y la transición hacia materiales intumescentes ecológicos. Además, se abordan los retos tecnológicos asociados al escalamiento, a la homogeneidad del material y a la compatibilidad con matrices poliméricas, destacando el potencial de los residuos agroindustriales para generar materiales de alto valor agregado en el marco de la economía circular.

Palabras clave: Nanolignina, nanocelulosa, retardantes de llama, biomasa lignocelulósica, sostenibilidad, economía circular, polímeros, recubrimientos ignífugos.

Daylin Torres Rosabal ¹,
Nayra Ochoa Viñals ¹,
Rodolfo Ramos González ²,
José Luis Martínez
Hernández ¹, Lourdes
Georgina Michelena
Álvarez ³, Héctor Arturo
Ruiz Leza ¹, Anna Iliná ¹

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. V. Carranza e Ing. José Cárdenas V., Col. República, 25280 Saltillo, Coahuila, México

² SECIHTI - Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México

³ Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, Vía Blanca # 804 entre Carretera Central y Calzada Vieja de Guanabacoa, San Miguel del Padrón. La Habana, CP-11000. Cuba

Correspondencia: Anna Iliná,
Correo: annailina@uadec.edu.mx,
ORCID: [0000-0001-5349-2852](https://orcid.org/0000-0001-5349-2852)



CienciAcierta

ABSTRACT

The growing demand for sustainable flame-retardant materials has fostered the development of lignocellulosic-based nanomaterials, particularly lignin and cellulose nanoparticles. Agro-industrial by-products such as sugarcane bagasse and pecan nutshells are abundant and renewable sources for producing nanolignin and nanocellulose via chemical or physicochemical hydrolysis. These nanomaterials exhibit structural and thermal properties that enhance char formation, reduce smoke emission, and improve the thermal stability of polymers and textiles. This review summarizes the current advances in extraction techniques, hydrolysis pretreatments, and nanoparticle production from lignocellulosic residues, emphasizing their mechanisms of action as flame retardants and their synergy with nitrogen- and phosphorus-containing additives. Applications in polymer coatings, biocomposites, foams, textiles, and multifunctional materials are highlighted. Additionally, sustainability considerations, techno-environmental advantages, and challenges such as dispersion, compatibility, and process scalability are discussed. Overall, lignocellulosic nanomaterials emerge as promising eco-friendly alternatives to conventional halogenated flame retardants, supporting the transition toward safer materials and circular bioeconomy strategies.

Keywords: Nanolignin, nanocellulose, flame retardants, lignocellulosic biomass, sustainability, circular economy, polymers, flame-retardant coatings.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales y urbanos representan uno de los desafíos ambientales y de seguridad más urgentes a nivel global. En los últimos años, el incremento en la frecuencia, la severidad y la extensión de estos eventos ha sido atribuido directamente al cambio climático, a la sequía prolongada y al aumento de la biomasa disponible para combustión. Este escenario ha impulsado la búsqueda de materiales con mayor resistencia térmica y propiedades ignífugas, capaces de mejorar la seguridad en sectores como la construcción, la industria textil y la fabricación de polímeros (Chollet y col., 2019). Tradicionalmente, esta función ha sido desempeñada por retardantes de llama halogenados, ampliamente



utilizados por su eficiencia y bajo costo. Sin embargo, la evidencia científica ha demostrado que estos compuestos liberan sustancias tóxicas durante su degradación térmica, pueden bioacumularse en organismos vivos, y generan residuos persistentes que contaminan suelos, agua y aire. Debido a ello, varias regulaciones internacionales han restringido su uso, lo que ha generado una necesidad urgente de desarrollar alternativas sostenibles, menos tóxicas y más seguras para el medio ambiente.

En este contexto, la biomasa lignocelulósica surge como un recurso renovable de alto potencial. Residuos agroindustriales como el bagazo de caña y la cáscara de nuez, abundantes en México, constituyen fuentes ricas en celulosa, hemicelulosa y lignina, biopolímeros que pueden transformarse mediante pretratamientos físico-químicos en materiales con funciones específicas. En particular, la lignina y la celulosa destacan por su estructura química y su disponibilidad: la lignina es un polímero aromático con elevada capacidad para formar carbón durante la combustión, mientras que la celulosa presenta alta cristalinidad y estabilidad térmica. Ambos pueden convertirse en nanopartículas, lo que incrementa notablemente su área superficial, su capacidad de interacción con matrices poliméricas y su desempeño como aditivos funcionales (Li y col., 2020).

México posee una disponibilidad estratégica de estas biomásas. El bagazo de caña, generado en grandes cantidades por la industria azucarera, y la cáscara de nuez pecana, altamente producida en estados como Chihuahua, Sonora y Coahuila, constituyen recursos poco aprovechados que pueden transformarse en materiales de alto valor agregado. Su uso no solo contribuye a reducir los residuos agroindustriales, sino que también impulsa una cadena de valor basada en la economía circular.

Esta revisión aborda las características estructurales de la biomasa lignocelulósica, las técnicas de extracción e hidrólisis para producir nanomateriales, los mecanismos de retardancia, y las aplicaciones actuales en recubrimientos poliméricos, textiles, espumas y biocomposites. Asimismo, se discuten ventajas, desafíos y brechas de investigación, destacando su relevancia en la economía circular y su potencial de implementación industrial



METODOLOGÍA

La presente revisión se elaboró mediante una búsqueda bibliográfica selectiva y estructurada en bases de datos científicas internacionales, incluyendo Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SpringerLink, abarcando publicaciones del periodo 2015–2025. Se utilizaron palabras clave en español e inglés relacionadas con la biomasa lignocelulósica, la lignina, la celulosa, los nanomateriales y los retardantes de llama (*nanolignin, lignin nanoparticles, nanocellulose, flame retardants, lignocellulosic biomass*). Se incluyeron artículos de investigación, revisiones especializadas y reportes técnicos que describieran métodos de pretratamiento, extracción e hidrólisis, síntesis de nanolignina y nanocelulosa, técnicas de caracterización y aplicaciones ignífugas en polímeros, textiles y recubrimientos. Se excluyeron documentos sin rigor científico, literatura duplicada y estudios no actualizados. La información recopilada se organizó por temas, lo que permitió analizar de forma comparativa las tendencias, avances y limitaciones en la producción y aplicación de nanomateriales lignocelulósicos como retardantes de llama sostenibles.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Biomasa lignocelulósica como fuente de nanomateriales

La biomasa lignocelulósica constituye la materia prima renovable más abundante del planeta y representa una alternativa estratégica para el desarrollo de materiales funcionales y sostenibles. Su estructura está conformada principalmente por tres biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyas proporciones y características varían según el origen vegetal. Estos componentes determinan no solo la integridad mecánica de los vegetales, sino también el potencial de aprovechamiento industrial para la obtención de nanomateriales con propiedades avanzadas. En las últimas décadas, la creciente necesidad de sustituir aditivos sintéticos por materiales ecológicos ha impulsado el estudio intensivo de la biomasa lignocelulósica como fuente para generar nanocelulosa y nanolignina, ambos con aplicaciones prometedoras en los campos de los retardantes de llama, recubrimientos, biocomposites y materiales poliméricos de alto desempeño (Solihat y col., 2022).



La celulosa, el componente estructural dominante, es un polímero lineal de β -D-glucosa con una marcada tendencia a formar regiones cristalinas mediante enlaces de hidrógeno. Esta característica confiere gran rigidez, estabilidad térmica y resistencia mecánica, cualidades que se potencian aún más cuando la celulosa se transforma en nanocristales (CNC) o nanofibrillas (CNF). Estas nanopartículas presentan una alta relación de aspecto, transparencia, biodegradabilidad y compatibilidad con múltiples matrices. Paralelamente, la hemicelulosa, aunque menos cristalina y más heterogénea, desempeña un papel relevante como polímero de enlace entre la celulosa y la lignina y puede contribuir a la formación de estructuras híbridas al someterse a diferentes pretratamientos (Hu y col., 2024).

La lignina, por su parte, es el biopolímero aromático más abundante de la naturaleza y presenta un papel esencial en la resistencia mecánica, impermeabilidad y protección contra ataque microbiano en las plantas. Su estructura tridimensional, rica en unidades fenilpropanoides, la convierte en una materia prima ideal para aplicaciones que requieren estabilidad térmica y formación de carbón, como los sistemas retardantes de llama. Sin embargo, la lignina en su estado natural presenta desafíos de compatibilidad y dispersión en matrices poliméricas. La producción de nanolignina soluciona muchas de estas limitaciones, ya que aumenta la superficie activa, mejora la interacción química con los polímeros y favorece la formación de capas carbonosas más densas y homogéneas durante la combustión (Costa y col., 2025).

México posee una ventaja competitiva en la disponibilidad de biomasas lignocelulósicas debido a la magnitud de su producción agroindustrial. El bagazo de caña de azúcar, generado tras la extracción del jugo en los ingenios, es uno de los residuos lignocelulósicos más abundantes. Con más de 55 millones de toneladas de caña procesadas cada año, el volumen de bagazo disponible es considerable y constituye una fuente económica y renovable de celulosa, hemicelulosa y lignina. Este residuo posee una composición aproximada de 42 % de celulosa, 25 % de hemicelulosa y 20 % de lignina (Mahmud y col., 2021; Rezende y col., 2011), lo que lo convierte en un sustrato ideal para la obtención de nanocelulosa y nanolignina mediante hidrólisis controlada.

De manera similar, la cáscara de nuez pecana es otro residuo agroindustrial ampliamente disponible en México, especialmente en estados líderes en producción como Chihuahua, Sonora y Coahuila. Su



composición, dominada por lignina y polisacáridos estructurales, la posiciona como un precursor atractivo para obtener lignina de alta pureza y nanopartículas lignínicas con capacidad retardante (de Prá Andrade y col., 2021; Mumbach y col., 2022). Además, este residuo ha sido históricamente subutilizado, por lo que su valorización representa una oportunidad clara para impulsar prácticas de economía circular en el sector agroalimentario.

El aprovechamiento de estas biomásas permite transformar recursos de bajo valor en productos avanzados, ampliando su ciclo de vida y reduciendo los impactos ambientales asociados a la acumulación de residuos. Asimismo, el uso de nanomateriales lignocelulósicos como sustitutos parciales o totales de aditivos sintéticos contribuye a reducir sustancias químicas tóxicas en productos industriales, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y seguridad humana. En particular, la nanoestructuración de la lignina y la celulosa ofrece ventajas decisivas frente a sus contrapartes micro o macro: mejor dispersión en matrices poliméricas, mayor reactividad superficial, interacción más eficiente en procesos de formación de carbón y, en muchos casos, incrementos significativos en la estabilidad térmica (Goliszek y col., 2024).

En conjunto, la biomasa lignocelulósica de origen agroindustrial no solo representa una opción renovable y abundante, sino también una plataforma tecnológica de alto potencial para el desarrollo de nanomateriales funcionales con aplicaciones en ingeniería de materiales, en particular en la producción de retardantes de llama sostenibles y de alto desempeño.

Métodos de extracción e hidrólisis para obtener lignina y celulosa nanoestructuradas

La obtención de nanolignina y nanocelulosa a partir de biomasa lignocelulósica requiere una combinación estratégica de pretratamientos físicos, químicos y fisicoquímicos que permitan desestructurar la matriz vegetal y liberar sus componentes principales. Debido a la naturaleza compleja y altamente recalcitrante de la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, el pretratamiento constituye la etapa crítica del proceso, ya que determina la eficiencia, el rendimiento y la calidad final de los nanomateriales obtenidos. En términos generales, los pretratamientos buscan desestabilizar la estructura lignocelulósica mediante la ruptura de



enlaces, la solubilización selectiva de componentes o la reducción del grado de polimerización, facilitando así la hidrólisis subsecuente y la formación de partículas micro- o nanoestructuradas (Xue y col., 2024).

Entre los métodos de pretratamiento más utilizados se encuentran los procesos físicos, como la molienda mecánica, el ultrasonido, las microondas y la pirólisis, que aumentan el área superficial, reducen el tamaño de partícula y mejoran la accesibilidad de las enzimas o de reactivos químicos. Estos métodos, aunque efectivos, suelen requerir un alto consumo energético si se emplean de forma aislada. Por ello, con frecuencia se combinan con pretratamientos químicos que facilitan una ruptura más eficiente de la matriz lignocelulósica (Woźniak y col., 2025).

La hidrólisis ácida es uno de los métodos más estudiados y empleados para la obtención de nanomateriales, especialmente de nanocelulosa. Este proceso emplea ácidos minerales, principalmente el ácido sulfúrico (H_2SO_4), para extraer selectivamente la fracción amorfa de la celulosa y favorecer la formación de nanocristales altamente cristalinos. En el caso de la lignina, la hidrólisis ácida contribuye a romper enlaces éter, a liberar fracciones de bajo peso molecular y a facilitar la formación de nanopartículas mediante precipitación controlada.

Los métodos químicos alternativos incluyen pretratamientos alcalinos, procesos organosolv, solventes acuosos, líquidos iónicos y ozonólisis (Tabla 1). El pretratamiento alcalino (NaOH , KOH o $\text{Ca}(\text{OH})_2$) es particularmente eficaz para solubilizar la lignina y reducir la cristalinidad de la celulosa, lo que facilita la hidrólisis posterior. Los procesos organosolv, que utilizan mezclas de etanol, acetona u otros solventes orgánicos bajo condiciones ácidas o neutras, permiten obtener lignina de alta pureza, con bajo contenido de azufre, adecuada para aplicaciones de alto valor agregado. Los líquidos iónicos han captado la atención por su capacidad para disolver por completo la biomasa, aunque su costo limita su uso a escala industrial. Finalmente, métodos más recientes, como la ozonólisis, permiten eliminar la lignina sin degradar significativamente la celulosa, lo que abre nuevas posibilidades para la obtención de nanomateriales funcionales (Oualil y col., 2025).

Una vez liberados los componentes estructurales, es necesario aislar la lignina y la celulosa. La lignina se clasifica en lignina de madera molida (MWL), lignina enzimática (MWEL), lignina tipo Kraft, lignina tipo soda y lignina Klason, cada una con ventajas y limitaciones particulares. La MWL tiene la ventaja de conservar estructuras similares a las de la lignina nativa,



aunque su rendimiento es bajo. La lignina enzimática permite obtener mayores rendimientos, pero puede presentar contaminación por carbohidratos. Las ligninas Kraft, soda y sulfito son subproductos industriales disponibles a gran escala, aunque su estructura suele diferir significativamente de la lignina natural debido a las condiciones extremas de los procesos de *pulping*. Para fines de síntesis de retardantes de llama, la pureza estructural de la lignina no siempre es esencial. Sin embargo, su composición, su peso molecular y su contenido fenólico sí influyen directamente en su desempeño ignífugo (Tang y col., 2020).

TABLA 1. COMPARACIÓN ENTRE PRETRATAMIENTOS PARA OBTENCIÓN DE NANOMATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

Pretratamiento	Ventajas	Desventajas	Tipo de nanomaterial obtenido
Ácido (H_2SO_4 diluido)	Alta eficiencia, favorece CNC y nanolignina	Riesgo de degradación; manejo corrosivo	Nanocristales de celulosa, nanolignina
Alcalino (NaOH)	Solubiliza lignina; limpia celulosa	Puede degradar hemicelulosa	Celulosa purificada (precursor CNC/CNF)
Organosolv	Lignina de alta pureza	Costoso, solventes recuperables	Nanolignina de calidad superior
Líquidos iónicos	Disuelve biomasa completa	Muy costoso, recuperación compleja	Nanocelulosa y lignina modificada
Ultrasonido	Reduce tamaño; ecoeficiente	Limitado para grandes volúmenes	Nanolignina y CNF
Hidrólisis enzimática	Alto control, específico	Costos de enzimas	Nanocelulosa altamente pura

Una vez aislados, los biopolímeros se someten a procesos que permiten la formación de nanomateriales. En el caso de la nanocelulosa, la hidrólisis ácida genera nanocristales de celulosa (CNC) mediante la eliminación selectiva de regiones amorfas, mientras que procesos mecánicos asistidos por ultrasonido pueden producir nanofibrillas (CNF). La nanolignina, por su

parte, puede obtenerse mediante precipitación en solución–antisolvente, ultrasonido, homogeneización a alta presión o hidrólisis controlada. La transición de lignina y celulosa a la nanoescala mejora su reactividad superficial, su capacidad de interacción con matrices poliméricas y su comportamiento térmico, factores críticos para su aplicación en retardancia de llama (Ortega-Sanhueza y col., 2024).

La caracterización de los materiales obtenidos es fundamental para garantizar su calidad y comprender su comportamiento en aplicaciones finales (Tabla 2). Técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y de transmisión (TEM) permiten visualizar la morfología y tamaño de las partículas, diferenciando entre materiales microestructurados y nanoestructurados. La espectroscopía infrarroja (FTIR) aporta información sobre los grupos funcionales y posibles modificaciones químicas (Ouadil y col., 2025)

TABLA 2. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE NANOLIGNINA Y NANOCELULOSA Y SU RELEVANCIA EN RETARDANCIA DE LLAMA

Técnica	Qué evalúa	Relevancia para retardación de llama
FTIR (Espectroscopía infrarroja)	Grupos funcionales, enlaces químicos, presencia de lignina/celulosa	Permite identificar la funcionalización (N, P, TiO ₂) que mejora la formación de carbón y la acción intumescente.
SEM (Microscopía electrónica de barrido)	Morfología superficial, tamaño microestructural	Evalúa la homogeneidad del recubrimiento y la calidad de la capa carbonosa post-combustión.
TEM (Microscopía electrónica de transmisión)	Tamaño y forma de nanopartículas (5–200 nm)	Determina si se lograron nanolignina/nanocelulosa, lo cual impacta directamente la dispersión y rendimiento ignífugo.
DLS (Dispersión de luz dinámica)	Distribución de tamaño en solución coloidal	Confirma estabilidad de nanopartículas y evita agregación que reduce la eficacia ignífuga.

TGA (Análisis termogravimétrico)	Degradación térmica, temperatura de inicio y residuos carbonosos	Es clave para evaluar el aumento en la formación de carbón y la mejora en estabilidad térmica aportada por los nanomateriales.
DSC (Calorimetría diferencial de barrido)	Transiciones térmicas (T _g , T _m), cambios de fase	Permite observar modificaciones en la estabilidad térmica del polímero tratado con nanolignina/nanolcelulosa.
XRD (Difracción de rayos X)	Cristalinidad de la celulosa; estructura molecular	Alta cristalinidad de la nanocelulosa → mayor estabilidad térmica y mejor sinergia con la lignina en sistemas FR.
UV-Vis	Comportamiento óptico, absorbancia (útil en lignina)	Confirma la presencia de nanolignina en suspensión y permite evaluar aplicaciones en textiles con dualidad colorante–FR.
Calorímetro de cono	HRR, pHRR, tiempo de ignición, residuos, humo	Es la prueba definitiva para validar el desempeño como retardante de llama.
Índice de oxígeno límite (LOI)	Porcentaje mínimo de oxígeno necesario para sostener combustión	Mide la eficacia de las formulaciones nanoestructuradas aplicadas a polímeros, textiles y espumas.

La difracción de rayos X (XRD) es esencial para determinar el índice de cristalinidad de la celulosa, mientras que los análisis térmicos (TGA/DSC) permiten evaluar la estabilidad térmica, la degradación y la capacidad de formación de carbón, parámetros directamente relacionados con el desempeño como retardantes de llama.

Finalmente, el conjunto de pretratamientos, métodos de aislamiento y técnicas de caracterización constituye una plataforma sólida para la transformación de biomásas agroindustriales en nanomateriales de alto valor agregado. La selección adecuada de las condiciones de hidrólisis y separación permite optimizar los rendimientos y obtener materiales con



propiedades térmicas y estructurales adecuadas para su evaluación como retardantes de llama sostenibles (de Araújo y col., 2024).

Mecanismos de acción de la lignina y nanolignina como retardantes de llama

El comportamiento de la lignina y sus derivados nanoestructurados como retardantes de llama se explica por una combinación de mecanismos térmicos y fisicoquímicos que actúan tanto en la fase condensada como en la fase gaseosa durante el proceso de combustión. A diferencia de los retardantes de llama halogenados, cuyo desempeño se basa principalmente en la captura de radicales libres en la fase de vapor, los biopolímeros lignocelulósicos operan principalmente promoviendo la formación de capas carbonosas protectoras. Este enfoque resulta más seguro, menos tóxico y ambientalmente benigno, lo que posiciona a la lignina como uno de los materiales naturales más prometedores para sustituir aditivos ignífugos convencionales (Chollet y col., 2019).

La lignina posee una estructura rica en anillos aromáticos y unidades fenólicas, lo que le confiere una alta resistencia térmica y una notable propensión a la carbonización. Cuando se expone al calor, la lignina inicia un proceso de deshidratación, reordenamiento aromático y policondensación que conduce a la formación de una capa de carbón densa, rígida y estable. Esta capa actúa como barrera física entre el material subyacente y el entorno, reduciendo la transferencia de oxígeno, calor y de productos volátiles inflamables. El carbón también ayuda a disminuir la emisión de gases combustibles, lo que reduce la velocidad de propagación del fuego y la intensidad de la llama. En sistemas poliméricos, este comportamiento se traduce en reducciones significativas de la tasa de liberación de calor (HRR), de la pérdida de masa y de la formación de humo, parámetros clave en ensayos con calorímetro de cono (Wang y col., 2023).

Además de su acción intrínseca en la fase condensada, la lignina puede participar en mecanismos sinérgicos al combinarla con compuestos ricos en nitrógeno y fósforo, formando sistemas intumescentes de alto desempeño. En estos sistemas, la lignina actúa como la principal fuente de carbono, mientras que los aditivos fosforados actúan como agentes acidificantes que catalizan la deshidratación y la formación acelerada del carbón. Los compuestos nitrogenados, como melamina, urea o



CienciAcierta

polietilenimina, liberan gases inertes al calentarse, lo que favorece la expansión de la capa carbonosa y la formación de estructuras espumadas que aumentan la capacidad aislante del recubrimiento. Este tipo de sinergias ha sido ampliamente documentado en estudios recientes, en los que ligninas modificadas con fósforo y nitrógeno han mostrado mejoras significativas en la supresión de la llama y la reducción del humo, incluso a bajas concentraciones (Ribeiro y col., 2019).

La nanoescala potencia considerablemente estos mecanismos. La nanolignina, obtenida por hidrólisis controlada, ultrasonido o precipitación en sistemas solvente–antisolvente, presenta un tamaño promedio entre 20 y 200 nm, según el método de producción. Esta reducción aumenta la superficie específica, mejora la reactividad de los grupos funcionales y permite una dispersión más homogénea en matrices poliméricas (Won y col., 2024). De esta forma, la nanolignina actúa de manera más eficiente como agente carbonizante, generando capas de protección más continuas, compactas y resistentes a la oxidación. Además, su tamaño reducido facilita la interacción con otros aditivos, lo que permite la formación de redes híbridas con óxidos metálicos, silicatos y nanomateriales bidimensionales, como MXene o dióxido de titanio (TiO_2), que han demostrado sinergias importantes en la mejora del comportamiento térmico y de la resistencia al fuego (Liu y col., 2024).

Se ha observado que ligninas con mayor contenido fenólico, peso molecular moderado y baja presencia de carbohidratos residuales tienden a formar carbón de mejor calidad y a alcanzar una mayor estabilidad térmica. Asimismo, estudios recientes muestran que la nanolignina funcionalizada con elementos como el fósforo puede incrementar significativamente el rendimiento carbonoso y disminuir parámetros como la máxima tasa de liberación de calor (pHRR), lo que evidencia su potencial como aditivo ignífugo sostenible (Azimvand y col., 2018).

En conjunto, la lignina y la nanolignina actúan como retardantes de llama mediante mecanismos complementarios que incluyen la formación de carbón, la protección en fase condensada, la reducción de volátiles inflamables y la sinergia con aditivos nitrogenados o fosforados. Estos mecanismos, sumados al carácter renovable, biodegradable y no tóxico del material, hacen de la lignina nanoestructurada una alternativa viable para el desarrollo de retardantes de llama avanzados, seguros y alineados con los principios de la economía circular (Luo y col., 2021).



La aplicación de nanolignina y nanocelulosa como retardantes de llama ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a su carácter sostenible, su compatibilidad con matrices poliméricas y su capacidad para mejorar simultáneamente la estabilidad térmica, la resistencia mecánica y la seguridad ignífuga de diversos materiales. La transición hacia nanoestructuras maximiza las ventajas intrínsecas de estos biopolímeros, ya que la reducción de tamaño incrementa la reactividad superficial, mejora la dispersión y permite interacciones más eficientes en las fases condensada y gaseosa durante el proceso de combustión. Estos factores, combinados con su origen renovable y su baja toxicidad, han impulsado su integración en polímeros termoplásticos, recubrimientos, materiales textiles, espumas y compuestos híbridos avanzados.

Una de las áreas en las que estos nanomateriales han demostrado mayor impacto es en los polímeros termoplásticos, especialmente en matrices como el polipropileno (PP) y el ácido poliláctico (PLA) (Costes y col., 2017). En composites de PP, por ejemplo, la incorporación de nanolignina funcionalizada con MXene ha permitido obtener materiales con clasificación UL-94 V-0 empleando únicamente 18 % de aditivo, reduciendo la liberación de calor y humo y mejorando significativamente las propiedades mecánicas, la resistencia al envejecimiento UV y el blindaje electromagnético. Estos hallazgos reflejan una tendencia creciente hacia la integración de nanolignina con nanomateriales bidimensionales, formando sistemas híbridos con sinergias reforzadas en la disipación térmica y la formación de capas carbonosas (Liu y col., 2024). En matrices de PLA, ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales y biomédicas, la adición de nanopartículas de lignina fosforilada ha demostrado disminuir la tasa máxima de liberación de calor (pHRR) y proteger al polímero de la degradación térmica durante el procesamiento. Estos resultados son especialmente relevantes porque consolidan la viabilidad de los nanoderivados de lignina como alternativas a los retardantes halogenados, típicamente empleados en termoplásticos pero asociados con toxicidad y emisión de sustancias persistentes (Wu y col., 2021).

Otro campo prominente es el de los recubrimientos poliméricos, donde la nanolignina ha sido utilizada tanto como refuerzo estructural como aditivo ignífugo. La combinación de lignina con dióxido de titanio (TiO_2) ha permitido desarrollar recubrimientos epoxi con propiedades avanzadas, manteniendo una buena adherencia y estabilidad mecánica, mientras se



mejora la resistencia al fuego. Estudios recientes han demostrado que la adición de nano-TiO₂ incrementa la masa residual del recubrimiento y prolonga el tiempo de protección térmica, debido a la formación de capas carbonosas más densas y a la estabilización del residuo carbonoso, lo que proporciona barreras efectivas frente a la ignición y la transferencia de calor. Esta clase de sistemas híbridos orgánico-inorgánicos es particularmente prometedora para industrias que requieren recubrimientos funcionales y sostenibles, como la construcción y el transporte (Song y col., 2024).

En el ámbito textil, la nanolignina también ha mostrado resultados notables. Las nanopartículas de lignina obtenidas a partir de bagazo de caña, además de funcionar como colorantes naturales para fibras sintéticas y naturales, han mejorado significativamente la capacidad de formación de carbón de los tejidos, aportando propiedades retardantes de llama. Asimismo, recubrimientos basados en nanolignina aplicados a poliéster han demostrado reducir en más de un 40 % la tasa máxima de liberación de calor y otorgar simultáneamente protección UV y actividad antioxidante (Ma y col., 2021). Esta multifuncionalidad representa una ventaja competitiva frente a recubrimientos sintéticos tradicionales, que a menudo requieren múltiples aditivos para cumplir funciones equivalentes (Liu y col., 2023).

En materiales más complejos, como espumas y elastómeros, la incorporación de nanolignina funcionalizada con nitrógeno y fósforo ha permitido desarrollar poliuretanos con desempeño ignífugo superior. Los elastómeros obtenidos presentan altos valores del índice de oxígeno límite (LOI), alcanzando cerca de 30 %, y cumplen con la clasificación UL-94 V-0, además de exhibir resistencia mecánica mejorada. El mecanismo clave radica en la formación de una capa carbonosa altamente resistente a la oxidación, favorecida por la presencia de grupos funcionales que actúan como entrecruzadores durante el proceso de degradación térmica (He y col., 2022).

Los hidrogeles poliméricos basados en nanolignina también constituyen una vía emergente. Combinaciones de polivinil alcohol, goma xantana y nanopartículas de lignina, entrecruzadas mediante sistemas NaOH-bórax, han demostrado excelente capacidad para formar películas protectoras y generar altos valores de LOI en sustratos textiles. Estos sistemas biodegradables, además de ser seguros, representan una alternativa real



a recubrimientos sintéticos basados en compuestos halogenados o fosforados de alta toxicidad (Ingtipi y col., 2023).

Finalmente, la sinergia entre la nanocelulosa y la nanolignina ofrece un campo de aplicación aún más amplio. Mientras la nanocelulosa actúa como refuerzo estructural y contribuye a mejorar la estabilidad térmica y mecánica del material, la nanolignina aporta el componente principal de formación de carbón. Su combinación permite desarrollar materiales avanzados con equilibrio entre integridad mecánica y capacidad ignífuga, especialmente útiles en biocomposites y sustratos celulósicos modificados (Liu y col., 2022).

En conjunto, las aplicaciones de la nanolignina y nanocelulosa abarcan un espectro industrial amplio y en crecimiento, consolidando a estos nanomateriales como alternativas viables, sostenibles y de alto rendimiento para el desarrollo de retardantes de llama verdes. Su versatilidad, bajo costo y contribución a la reducción de residuos agroindustriales los posicionan como pilares estratégicos en la transición hacia materiales seguros, funcionales y alineados con principios de economía circular (Pereira y col., 2025)

Ventajas, desafíos y brechas de conocimiento

El uso de nanolignina y nanocelulosa como retardantes de llama sostenibles ofrece un conjunto significativo de ventajas que las posiciona como alternativas prometedoras frente a los aditivos ignífugos convencionales. Su principal fortaleza radica en su origen renovable: ambos materiales pueden obtenerse a partir de residuos agroindustriales ampliamente disponibles, como el bagazo de caña y la cáscara de nuez, lo que no solo reduce la dependencia de compuestos derivados del petróleo, sino que también promueve esquemas de economía circular y la valorización de subproductos agrícolas. Al ser biopolímeros, presentan baja toxicidad, biodegradabilidad y escasa tendencia a generar emisiones peligrosas durante su combustión, en contraste con los retardantes halogenados, conocidos por liberar sustancias persistentes, bioacumulables y dañinas para la salud humana y el medio ambiente. Además, sus estructuras químicas les otorgan funciones intrínsecas relevantes: la lignina, gracias a su carácter aromático, posee una excelente capacidad para formar carbón, mientras que la celulosa,



altamente cristalina, contribuye a mejorar la estabilidad térmica de los materiales en los que se incorpora (Xue y col., 2024).

No obstante, la implementación industrial de estos nanomateriales también plantea desafíos importantes. Uno de los principales aspectos es la variabilidad natural de la biomasa, ya que la composición de lignina, celulosa y hemicelulosa puede variar según la especie vegetal, las condiciones de cultivo o los métodos de procesamiento. Esto afecta directamente la reproducibilidad, el rendimiento y las propiedades finales de los nanomateriales obtenidos. Asimismo, la compatibilidad entre la nanolignina o la nanocelulosa y las matrices poliméricas suele ser limitada, especialmente en sistemas hidrofóbicos como el polipropileno o el polietileno, lo que puede provocar dispersión inadecuada, agregación y deterioro de las propiedades mecánicas. Las modificaciones químicas, aunque efectivas para mejorar la dispersión o incrementar el desempeño ignífugo, añaden complejidad al proceso y pueden aumentar los costos o comprometer la sostenibilidad del sistema si no se emplean reactivos ecológicos (Madyaratri y col., 2022).

Otro desafío importante es el escalamiento. Los métodos de hidrólisis ácida, ultrasonido o precipitación controlada utilizados para obtener nanopartículas funcionan eficientemente en laboratorio, pero su transferencia a niveles piloto o industriales enfrenta limitaciones operativas, altos consumos energéticos o dificultades en la recuperación y purificación del producto. Esto implica optimizar procesos, reducir el uso de reactivos corrosivos y desarrollar tecnologías más robustas para la producción continua de nanomateriales lignocelulósicos.

A pesar de los avances recientes, aún existen brechas de conocimiento que deben abordarse. Entre ellas destaca la necesidad de comprender con mayor detalle cómo variables como el peso molecular, la distribución de grupos funcionales y el tamaño de partícula influyen en el comportamiento retardante. Durante la combustión, la interacción entre nanolignina, nanocelulosa y otros agentes sinérgicos, como compuestos de nitrógeno o fósforo, requiere estudios más profundos para diseñar formulaciones más eficientes y estables. También es necesario ampliar la investigación sobre sistemas híbridos orgánico-inorgánicos que incorporen óxidos metálicos, nanoclay o MXene para maximizar las propiedades térmicas y mecánicas (Liu y col., 2024).

Por último, la falta de normativas específicas y de metodologías estandarizadas para evaluar retardantes de llama de origen biológico



representa una limitación que obstaculiza su adopción comercial. La generación de datos comparativos, la evaluación del ciclo de vida y la validación en escenarios de uso real serán claves para consolidar su integración en sectores como la construcción, el textil y la industria polimérica.

En conjunto, aunque las oportunidades son notables, el éxito de la nanolignina y la nanocelulosa como retardantes de llama sostenibles dependerá de superar las barreras tecnológicas actuales y de profundizar en el desarrollo de formulaciones optimizadas, escalables y ambientalmente seguras.

CONCLUSIONES

La literatura revisada muestra que la lignina y la celulosa, especialmente en su forma nanoestructurada, representan alternativas prometedoras a los retardantes de llama halogenados debido a su origen renovable, su baja toxicidad y su capacidad para mejorar la estabilidad térmica de materiales poliméricos. Residuos lignocelulósicos como el bagazo de caña y la cáscara de nuez constituyen fuentes accesibles para la obtención de nanolignina y nanocelulosa mediante procesos de hidrólisis y pretratamientos apropiados, lo que favorece la valorización de desechos agroindustriales. La nanolignina destaca por su elevada capacidad de formación de carbón y por su acción en fase condensada, mientras que la nanocelulosa aporta refuerzo térmico y estructural. Su combinación o funcionalización con compuestos nitrogenados y fosforados puede potenciar la acción intumescente, lo que permite desarrollar formulaciones sostenibles con buen desempeño ignífugo. No obstante, persisten desafíos relacionados con la variabilidad de la biomasa, la optimización de los métodos de producción, la compatibilidad con matrices hidrofóbicas y el escalamiento industrial. Aun así, la evidencia indica que estos nanomateriales constituyen una vía sólida hacia retardantes de llama verdes aplicables a polímeros, textiles y recubrimientos, contribuyendo al avance de materiales más seguros y alineados con la economía circular.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidad, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el apoyo mediante beca y el Programa de Investigadoras e investigadores por México (proyecto 729).



REFERENCIAS

- Azimvand, J., Didehban, K., Mirshokrai, S. A. (2018). Preparation and Characterization of Lignin Polymeric Nanoparticles Using the Green Solvent Ethylene Glycol: Acid Precipitation Technology. *BioResources*, 13(2): 2887-2897. <https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2887-2897>
- Chollet, B., Lopez-Cuesta, J.-M., Laoutid, F., & Ferry, L. (2019). Lignin Nanoparticles as A Promising Way for Enhancing Lignin Flame Retardant Effect in Polylactide. *Materials*, 12(13): 2132. <https://doi.org/10.3390/ma12132132>
- Costa, S. A., Pereira, P. H. F., & Arantes, V. (2025). Efficient production of lignin nanoparticle colloids and their use as eco-friendly dyes for textiles. *Industrial Crops and Products*, 225: 120390. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120390>
- Costes, L., Laoutid, F., Brohez, S., & Dubois, P. (2017). Phytic acid-lignin combination: A simple and efficient route for enhancing thermal and flame retardant properties of polylactide. *European Polymer Journal*, 94: 270-285. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.07.018>
- de Araújo, L. G. S., Rodrigues, T. H. S., Rates, E. R. D., Alencar, L. M. R., Rosa, M. de F., Ponte Rocha, M. V. (2024). Production of Cellulose Nanoparticles from Cashew Apple Bagasse by Sequential Enzymatic Hydrolysis with an Ultrasonic Process and Its Application in Biofilm Packaging. *ACS Omega*, 9(51): 50671-50684. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c08702>
- de Prá Andrade, M., Piazza, D., & Poletto, M. (2021). Pecan nutshell: Morphological, chemical and thermal characterization. *Journal of Materials Research and Technology*, 13: 2229-2238. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.05.106
- Goliszek, M., Podkościelna, B., Rybiński, P., Klapiszewska, I., Klepka, T., Masek, A., & Klapiszewski, Ł. (2024). Toward a green economy: Lignin-based hybrid materials as functional additives in flame-retardant polymer coatings. *Journal of Polymer Research*, 31: 316. <https://doi.org/10.1007/s10965-024-04169-z>
- He, T., Chen, F., Zhu, W., & Yan, N. (2022). Functionalized lignin nanoparticles for producing mechanically strong and tough flame-retardant polyurethane elastomers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209(Part A): 1339-1351. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.089>



- Hu, M., Lv, X., Wang, Y., Zhang, Y., Dai, H. (2024). Guideline for the Extraction of Nanocellulose from Lignocellulosic Feedstocks. *Food Biomacromolecules*, 1(1): 9–17. <https://doi.org/10.1002/fob2.12011>
- Ingtipi, K., Choudhury, B. J., & Moholkar, V. S. (2023). Development of NaOH-borax crosslinked PVA-xanthan gum-lignin hydrogel as green fire retardant coating. *Progress in Organic Coatings*, 174: 107268. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107268>
- Li, P., Liu, C., Xu, Y.-J., Liu, Y., & Jiang, Z. (2020). Novel and eco-friendly flame-retardant cotton fabrics with lignosulfonate and chitosan through LbL: Flame retardancy, smoke suppression and flame-retardant mechanism. *Polymer Degradation and Stability*, 181: 109302. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109302>
- Liu, K.; Zhuang, Y., Chen, J., Yang, G.; Dai, L. (2022). Research Progress on the Preparation and High-Value Utilization of Lignin Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(13): 7254. <https://doi.org/10.3390/ijms23137254>
- Liu, Y., Li, C., Li, C. X., Xu, L., Zhou, S., Zhang, Z., Zhang, J., Soham, D., Fan, R., Liu, H., Chen, G., Li, Y., Ling, T., Li, Z., Tao, J., Wan, J. (2023). Porous, robust, thermally stable, and flame retardant nanocellulose/polyimide separators for safe lithium-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 11: 23360-23369. <https://doi.org/10.1039/D3TA05148J>
- Liu, Y., Zhao, X., Liu, Z., Sun, B., Liu, X., Zhao, R., Liu, B., Sun, Z., Men, Y., Hu, W., & Shao, Z.-B. (2024). Functionalized lignin nanoparticles assembled with MXene reinforced polypropylene with favorable UV-aging resistance, electromagnetic shielding effects and superior fire-safety. *International Journal of Biological Macromolecules*, 265: 130957. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130957>
- Luo, T., Wang, C., Ji, X., Yang, G., Chen, J., Janaswamy, S., Lyu, G. (2021). Preparation and Characterization of Size-Controlled Lignin Nanoparticles with Deep Eutectic Solvents by Nanoprecipitation. *Molecules*, 26(1): 218. <https://doi.org/10.3390/molecules26010218>
- Ma, T., Hu, X., Lü, S., Cui, R., Zhao, J., Hu, X., Song, Y. (2021). Cellulose Nanocrystals Produced Using Recyclable Sulfuric Acid as Hydrolysis Media and Their Wetting Molecular Dynamics Simulation.



International Journal of Biological Macromolecules, 184: 405-414.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.094>

Madyaratri, E. W., Ridho, M. R., Aristri, M. A., Lubis, M. A. R., Iswanto, A. H., Nawawi, D. S., Antov, P., Kristak, L., Majlingová, A., & Fatriasari, W. (2022). Recent advances in the development of fire-resistant biocomposites- A review. *Polymers*, 14(3): 362.
<https://doi.org/10.3390/polym14030362>

Mahmud, M. A., & Anannya, F. R. (2021). Sugarcane bagasse – A source of cellulosic fiber for diverse applications. *Heliyon*, 7(8): e07771.
 DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07771

Mumbach, G. D., Alves, J. L. F., da Silva, J. C. G., Di Domenico, M., Arias, S., Pacheco, J. G. A., Marangoni, C., & Machado, R. A. F. (2022). Prospecting pecan nutshell pyrolysis as a source of bioenergy and bio-based chemicals using multicomponent kinetic modeling, thermodynamic parameters estimation, and Py-GC/MS analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153: 111753. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111753

Ortega-Sanhueza, I., Girard, V., Ziegler-Devin, I., Chapuis, H., Brosse, N., Valenzuela, F., Banerjee, A., Fuentealba, C., Cabrera-Barjas, G., Torres, C., Méndez, A., Segovia, C., & Pereira, M. (2024). Preparation and Characterization of Lignin Nanoparticles from Different Lignin Sources Using the Antisolvent Nanoprecipitation Method. *Polymers*, 16(11): 1610. <https://doi.org/10.3390/polym16111610>

Ouadil, B., Sair, S., & Ait Ousaleh, H. (2025). Lignin nanoparticles based coatings for multifunctional polyester textiles with flame retardant, antioxidant, and UV protective properties. *Journal of Dispersion Science and Technology*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1080/01932691.2025.2519394>

Pereira, P. H. F., Costa, S., Costa, S. M., & Arantes, V. (2025). Efficient production of lignin nanoparticle colloids and their feasibility for eco-friendly dyeing of natural and synthetic textile fabrics. *Industrial Crops and Products*, 225: 120390.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120390>

Rezende, C. A., de Lima, M. A., Maziero, P., deAzevedo, E. R., Garcia, W., & Polikarpov, I. (2011). Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility.



Biotechnology for Biofuels, 4: 54.
DOI: 10.1186/1754-6834-4-54

- Ribeiro, R. S. A., Pohlmann, B. C., Calado, V., Bojorge, N., Pereira, N. (2019). Production of Nanocellulose by Enzymatic Hydrolysis: Trends and Challenges. *Engineering in Life Sciences*, 19(4): 279-291. <https://doi.org/10.1002/elsc.201800158>
- Solihat, N.N., Hidayat, A.F., Taib, M.N.A.M., Hussin, M.H., Lee, S.H., Ghani, M.A.A., Edrus, S.S.A.O., Vahabi, H., Fatriasari, W. (2022). Recent Developments in Flame-Retardant Lignin-Based Biocomposite: Manufacturing, and characterization. *Journal of Polymers and the Environment*, 30: 4517–4537. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02494-2>
- Song, X., Guo, W., Zhu, Z., Han, G., & Cheng, W. (2024). Preparation of uniform lignin/titanium dioxide nanoparticles by confined assembly: A multifunctional nanofiller for a waterborne polyurethane wood coating. *International Journal of Biological Macromolecules*, 258: 128827. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128827>
- Tang, Q.; Qian, Y.; Yang, D.; Qiu, X.; Qin, Y.; Zhou, M. (2020). Lignin-Based Nanoparticles: A Review on Their Preparations and Applications. *Polymers*, 12(11): 2471. <https://doi.org/10.3390/polym12112471>
- Wang, Y., Liu, H., Wang, Q. (2023). Recent Advances in Sustainable Preparation of Cellulose Nanocrystals via Solid Acid Hydrolysis: A Mini-Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253: 127353. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127353>
- Won, S., Jung, M., Bang, J., Cho, S. Y., Choi, I.-G., & Kwak, H. W. (2024). Lignin-based flame retardant via sequential purification-nanoparticle formation, and NP coupled chemical modification. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281: 136499. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136499>
- Woźniak, A., Kuligowski, K., Świerczek, L., & Cenian, A. (2025). Review of Lignocellulosic Biomass Pretreatment Using Physical, Thermal and Chemical Methods for Higher Yields in Bioethanol Production. *Sustainability*, 17(1), 287. <https://doi.org/10.3390/su17010287>
- Wu, Q., Ran, F., Dai, L., Li, C., Li, R., & Si, C. (2021). A functional lignin-based nanofiller for flame-retardant blend. *International Journal of Biological Macromolecules*, 184: 1004-1013. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.233>
- Xue, M., Xu, J., Li, Y., Jia, W., Wang, H., Xie, Z., Guo, F., Liang, F., Zhang, Y., & Wu, J. (2024). Flame retardant effect of lignin/carbon



nanohorns/potassium carbonate composite flame retardant on fir pretreated under different methods. *Thermochimica Acta*, 731: 179641. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2023.179641>