

Sección: Hot Science

Lignina: El tesoro para una industria sostenible

Lignin: Treasure for a sustainable industry

Miriam Sedano Mendoza*
Nancy Eloisa Rodriguez Olalde

Facultad de ingeniería en tecnología de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Michoacán, México.

*Autor para la correspondencia: miriam.sedano@umich.mx

RESUMEN

La lignina es un polímero natural complejo que aporta rigidez, resistencia mecánica y protección a la pared celular vegetal. Considerada durante décadas un subproducto de la industria papelera, actualmente se reconoce como una materia prima estratégica para la bioeconomía. Este artículo aborda su estructura molecular, diversidad y principales métodos de obtención, así como sus aplicaciones emergentes en bioplásticos, materiales compuestos, fibras de carbono, adhesivos y productos químicos de alto valor. Asimismo, se examinan los desafíos tecnológicos y económicos que limitan su valorización industrial y se destaca su potencial para impulsar la transición hacia una economía circular y sostenible.

Palabras clave: Lignina, biomasa, bioeconomía, materiales sostenibles.

SUMMARY

Lignin is a complex natural polymer within the plant cell wall that provides rigidity, mechanical strength, and pathogen defense. Historically dismissed as a mere byproduct of the pulp and paper industry, it is now recognized as a strategic feedstock for the global bioeconomy. This review examines its molecular architecture, structural diversity, and current extraction methods. Furthermore, it analyzes emerging applications in bioplastics, composite materials, carbon fibers, adhesives, and high-value platform chemicals. Finally, the main technical and economic challenges hindering its industrial-scale valorization are discussed, highlighting lignin's pivotal role in the transition toward a sustainable and circular economy.

Keywords: Lignin, biomass, bioeconomy, sustainable materials.

La molécula rebelde del mundo vegetal

La lignina es un polímero tridimensional, amorfo y complejo que constituye la pared celular de las plantas [1]. Su función principal es la de “pegamento” intercelular: une las células vegetales entre sí, rellena los espacios intersticiales y aporta rigidez y resistencia mecánica al organismo. Por ello, es un componente esencial en tejidos que requieren soporte estructural y dureza, tales como tallos, troncos, raíces y cáscaras de semillas o frutos [1], característica observable, por ejemplo, en el tronco de la jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*), como se muestra en la Figura 1. En su estado aislado, la lignina se presenta como un polvo marrón oscuro, mientras que bajo el microscopio óptico exhibe una apariencia de partícula translúcida.

En el ámbito de la biología, la lignina es reconocida como un polímero natural clave para el desarrollo y soporte de las plantas leñosas. Sin embargo, su arquitectura molecular es mucho más compleja y fascinante de lo que parece, ya que se origina mediante la unión de tres tipos de monómeros fundamentales [1, 2]. Un monómero actúa como un eslabón que, al enlazarse repetidamente con otros, conforma macroestructuras. En la lignina, estas unidades se llaman lignoles (por la lignina), monómeros aromáticos o unidades fenilpropanoides (por

su estructura química). Los tres lignoles que se han identificado son: el alcohol coniferílico (G), el alcohol sinapílico (S), y el alcohol paracumarílico (H). Estos lignoles se unen entre sí de forma aleatoria y muy variada mediante enlaces carbono-oxígeno-carbono (conocidos en química como enlaces éter) y carbono-carbono [1, 3]. Esta diversidad de uniones da lugar a una red tridimensional compleja y altamente ramificada, como se muestra en la Figura 2, de la cual derivan la gran variedad estructural y las propiedades características de la lignina [3].

La cantidad de lignoles presentes (G, S y H) y la proporción de enlaces formados varía significativamente entre las distintas especies de plantas. Y no solo eso: esta variación se encuentra en una misma planta, en distintas partes, como la raíz, el tallo y las hojas. En este sentido, los científicos no encuentran una lignina sino varias ligninas, es decir, no hay una estructura única y definida de la lignina, más bien es una molécula rebelde que se forma según lo dicta la biología molecular de la planta. Por ejemplo, los árboles de pino tienen una lignina compuesta principalmente por lignoles tipo G, los árboles de hoja ancha (como el encino) contienen más cantidad de lignoles tipo G y S, y las plantas como el pasto del jardín presentan los tres tipos de lignoles (G, S y H) [2, 3].

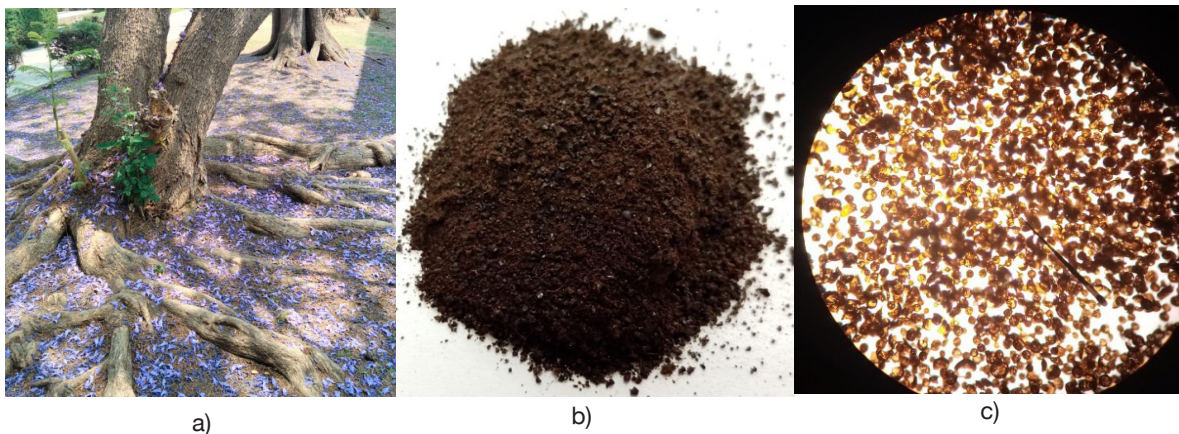


Figura 1. a) Árbol de jacaranda (*J. mimosifolia*), b) Lignina en polvo, c) Microfotografía óptica de la muestra de lignina (aumentado 10x) donde se observa su morfología y estructura. Fotos del autor.

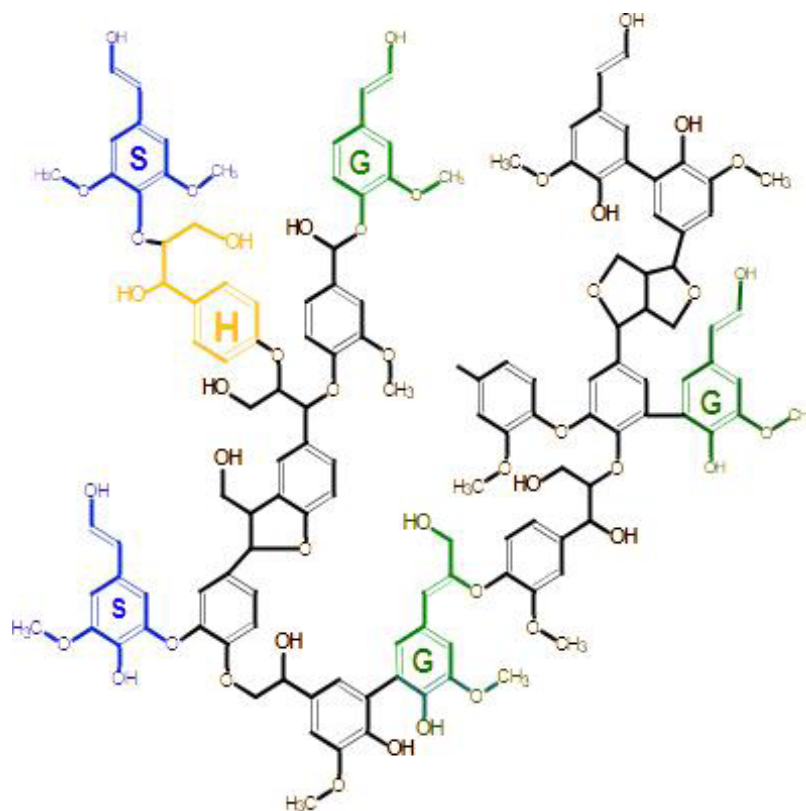


Figura 2. Estructura química representativa de la lignina. Diseño del autor

Esta variabilidad estructural que tiene la lignina impacta directamente en sus propiedades físicas y químicas como el color, la solubilidad y la reactividad. Los científicos estudian la lignina desde esta perspectiva compleja para poder aprovecharla de manera eficiente en diversas aplicaciones industriales. Más que una molécula única, la lignina es una familia muy diversa de polímeros que esconde un enorme potencial biotecnológico [2].

De considerarse un desecho, a convertirse en un recurso valioso

Durante mucho tiempo, la lignina fue un subproducto no deseado de la industria; muchos la han considerado un desecho. Específicamente, la industria papelera cocina la madera y disuelve la lignina para dejar libre la celulosa y así producir el papel. Se estima que a nivel mundial se generan cerca de 50 millones de

toneladas anuales de lignina como residuo [4, 5]. Tradicionalmente, este material se quema para producir calor y energía, lo que reduce su valor a un solo uso y limita su potencial como fuente de materiales y productos químicos de alto valor. Sin embargo, el aumento de la conciencia global sobre la sustentabilidad ha posicionado a la lignina como el biomaterial más prometedor para el desarrollo de nuevos productos como bloqueadores solares, hidrogeles antioxidantes o biomateriales inteligentes. Este cambio de paradigma ha transformado la lignina, que pasó de ser considerada un simple residuo industrial a un recurso de alto valor [4, 5]. Actualmente, este subproducto se reevalúa bajo un enfoque distinto: en lugar de considerarse un residuo, se proyecta como un pilar fundamental para las biorrefinerías modernas, industrias diseñadas para procesar biomasa de manera integral, para la obtención de bioproductos de origen renovable. En este sentido, la lignina como biomasa abundante tiene poten-

'BIORREFINERÍA INTEGRADA Y OBTENCIÓN SOSTENIBLE DE LIGNINA'

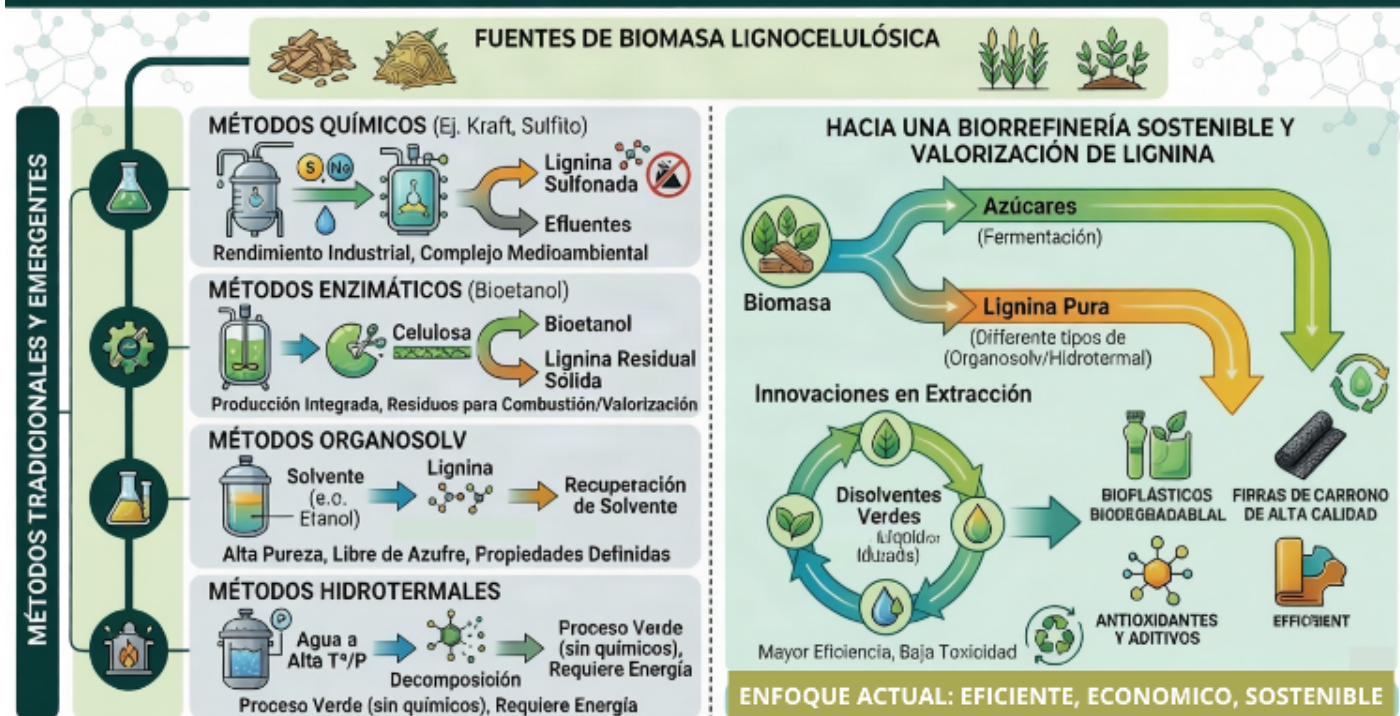


Figura 3. Lignina como recurso para la producción de nuevos materiales [3] / Imagen generada con la IA sobre diferentes fuentes de biomasa lignocelulósica.



Figura 4. Aplicaciones clave de la lignina en la industria sostenible. / Imagen generada con la IA.

cial para desarrollar productos innovadores de alto valor. La naturaleza nos provee de abundantes fuentes de lignina en forma de residuos agroforestales, por ejemplo, como las ramas de árboles, las cortezas, el aserrín, el bagazo de caña, la paja de cereales y los tallos de girasol. La lignina se obtiene mediante diversos procesos; entre los métodos más comunes están: los que utilizan sustancias químicas (ligninas químicas); los que utilizan enzimas para la producción de bioetanol que dejan a la lignina como residuo sólido; los que utilizan solventes orgánicos para disolver y separar la lignina (ligninas organosolv) y los procesos hidrotermales que utilizan agua a alta temperatura y presión para descomponer la biomasa y obtener la lignina (Figura 3) [3]. Las investigaciones actuales se centran en desarrollar métodos más eficientes, económicos y sostenibles para obtener lignina de alta calidad.

Las aplicaciones actuales de la lignina son un abanico de posibilidades

Este es el punto donde todo se vuelve fascinante. Actualmente, la lignina se utiliza para la producción de materiales avanzados como bioplásticos [6], materiales compuestos [7] y fibras de carbono [6, 7]. En los bioplásticos, la lignina se utiliza para mejorar propiedades como la rigidez y la resistencia térmica; en los materiales compuestos, la lignina se mezcla con otras fibras para mejorar sus propiedades mecánicas, resistencia al agua y biodegradabilidad; y para la fabricación de las fibras de carbono, la lignina se usa porque es un material ligero y de alta resistencia que puede ser implementado en industrias como la aeroespacial, la automotriz y la deportiva [6, 7]. Además, se emplea como una materia prima para la producción de biocombustibles y de energía como el combustible sólido, el bio-oil y el syngas. En aplicaciones biomédicas como hidrogeles y cápsulas, la lignina se utiliza para la liberación controlada de fármacos y como

material adsorbente en el tratamiento de agua donde se capturan metales pesados y otros contaminantes [6, 7].

En general, la lignina es un material con alto potencial para convertirse en una fuente valiosa de materiales y productos químicos sostenibles. Su aprovechamiento contribuye a valorizar los residuos agroforestales, a la sustentabilidad y a la construcción de una bioeconomía más respetuosa con el medio ambiente (Figura 4).

¿Cuáles son los desafíos que enfrenta la lignina?

Como te habrás dado cuenta, la lignina es un material con alto potencial para la industria, pero también es una molécula rebelde e impredecible. La ciencia sigue trabajando en comprender su comportamiento y así predecir procesos y generar rutas de trabajo [3, 6]. Si bien uno de los retos más importantes para la ciencia es seguir estudiando su estructura que como sabemos es altamente compleja y heterogénea ya que está formada por enlaces químicos difíciles de romper y que representa un desafío en cuanto a su manipulación controlada durante los procesos que deben ser lo suficientemente eficientes sin que generen productos no deseados [6, 7].

Otro desafío que presenta el uso de la lignina en la industria es hacer la transición del laboratorio a los procesos a escala industrial [7]. Por ejemplo, algunas tecnologías funcionan bien en pequeña escala, pero cuando se aumenta la producción se enfrentan a dificultades como los costos elevados de procesamiento, ya que los métodos actuales requieren reactivos caros o condiciones de alta temperatura y presión; también la eficiencia en la recuperación de lignina pura, ya que requiere pasos adicionales de purificación para lograr que la producción sea constante y homogénea.

Para que la lignina pueda mantenerse en

la industria es necesario desarrollar procesos más eficientes, selectivos y rentables. Esto implica la optimización de procesos, el desarrollo de rutas de trabajo reproducibles y la implementación de procesos de separación y purificación eficientes [6, 7]. Para superar estas barreras se requiere colaboración entre la investigación y la industria, la innovación tecnológica, la inversión y la creación de políticas de apoyo que fomenten la transición hacia una bioeconomía basada en recursos renovables como la lignina. El potencial está ahí, y la ciencia está trabajando arduamente para desbloquearlo.



Figura 5. La lignina como parte fundamental de la bioeconomía. Diseñado por el autor con apoyo de la IA.

La lignina en la industria verde

Actualmente, la ciencia y la tecnología están trabajando intensamente para superar los desafíos asociados con la lignina. Por ejemplo, se están desarrollando nuevas rutas de procesos y diseñando biorreactores con el fin de simplificar operaciones y reducir costos. Además, se está haciendo uso de herramientas computacionales para comprender mejor la estructura y la reactividad de la lignina y así predecir su comportamiento en los procesos de transformación [6].

La lignina juega un papel muy importante en la transición hacia una bioeconomía circular. En este sistema, la bioeconomía circular, los recursos biológicos se utilizan de manera sostenible, los residuos se minimizan y los productos se mantienen en el ciclo económico el

mayor tiempo posible [3, 7]. La lignina tiene el potencial de impactar positivamente en varios aspectos de este tipo de economía (Figura 5).

Como ejemplos tangibles de productos aplicables y elaborados con lignina se tienen: los bioplásticos y compuestos de lignina para envases biodegradables y compostables; el uso de lignina en materiales de construcción como aglomerantes, aditivos para cemento y componentes de aislamiento; la aplicación de derivados de lignina como bioestimulantes, agentes de liberación controlada en fertilizantes y componentes en sustratos de cultivo; la exploración del uso de fibras de carbono de lignina y lignina modificada en la producción de textiles con propiedades mejoradas, y la utilización de la estructura porosa de la lignina

para la fabricación de materiales adsorbentes de contaminantes como filtros para agua y aire [3, 4, 7]. Todos estos avances están permitiendo que la lignina deje de ser un residuo para convertirse en una materia prima versátil y de gran interés industrial. Es el futuro verde de la industria.

Bien, ahora que ya conoces todo su potencial, te invito a seguir explorando el maravilloso universo de la lignina.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT-4 (OpenAI) únicamente para sugerir una estructura inicial, para el resumen en inglés y para la creación de imágenes. Los autores revisaron y editaron todo el contenido generado por la IA y asumen toda la responsabilidad por la versión final del artículo.

Referencias

- [1] Jawaid, M., Ahmad, A., & Meraj, A. (Eds.). (2025). *Handbook of Lignin*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-96-7633-0>
- [2] Maceda, Agustín, Soto-Hernández, Marcos, Peña-Valdivia, Cecilia B., Trejo, Carlos, & Terrazas, Teresa. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y bosques*, 27(2), e2722137. Epub 04 de abril de 2022. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- [3] Chávez-Sifontes, Marvin., Dómine, Marcelo E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 4(4). Recuperado en 07 de abril de 2025, de <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323629266003.pdf>
- [4] Royal Society of Chemistry. (2024). Lignin valorization and waste streams analysis. RSC Green Chemistry

Series. Dessbesell, M., et al. (2020/2022). Global lignin supply overview and biorefinery integration. *MDPI Polymers*.

[5] Cámara Nacional de las Industrias de la Celulosa y del Papel. (2024). Informe Estadístico Anual de la Industria del Papel en México. CNICP / Cámara del Papel. SEMARNAT. (2021/2024). Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN): Producción total de celulosas y fibras.

[6] Jiju, P. S., Patel, A. K., Shruthy, N. S., Shalu, S., Dong, C.-D., & Singhanian, R. R. (2025). Sustainability through lignin valorization: Recent innovations and applications driving industrial transformation. *Bioresources and Bioprocessing*, 12, Artículo 88. <https://doi.org/10.1186/s40643-025-00929-x>

[7] Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H., & S. G., Bajwa. (2019). A concise review of current lignin production, applications, products and their environment impact. *Industrial Crops & Products*, 139, Artículo 111526. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111526>