VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Revalorización de Lignina (FASE IV): Síntesis de compuestos y aplicaciones en Ingeniería Ambiental

Lignin Valorization (PHASE IV): Synthesis of Compounds and Applications in Environmental Engineering

Zaira Valeria Barrientos Rico[1], Gustavo Adolfo Gutierrez Peña[1], Pedro A. Cano[1]*
[1] Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.
zv.barrientosrico@ugto.mx, ga.gutierrezpena@ugto.mx, pa.cano@ugto.mx

Resumen

La lignina suele considerarse un subproducto de poco valor en diversos procesos agroindustriales derivados de la biomasa. Sin embargo, su estructura química y la presencia de grupos funcionales como los hidroxilos permiten transformarla en un material con aplicaciones ambientales, en especial para la adsorción de metales pesados en agua. Este trabajo presenta una comparación entre la lignina y la lignina modificada con tetrazol como materiales adsorbentes de metales pesados. A partir de ensayos con cadmio, plomo y cromo, se muestra que la lignina tiene una afinidad significativa por los cationes de Pb y Cd, mientras que la adsorción es discreta para Cr. La lignina modificada con tetrazol presenta una mejoría notable en la adsorción de Cr.

Palabras clave: revalorización, lignina, funcionalización, adsorción.

Introducción

La creciente generación de residuos de biomasa proveniente de actividades agrícolas, forestales y agroindustriales ha impulsado el desarrollo de estrategias orientadas a su aprovechamiento dentro de esquemas de economía circular. Entre los principales residuos agrícolas generados a nivel regional se encuentran los derivados del cultivo de maíz, cuya producción genera grandes cantidades de biomasa residual que frecuentemente es sometida a quema a cielo abierto, disposición inadecuada o degradación natural sin aprovechamiento posterior. Estas prácticas contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, la degradación de suelos y la pérdida de recursos con potencial para la obtención de materiales de alto valor agregado. En este contexto, la valorización de los componentes de la biomasa lignocelulósica constituye una de las líneas de investigación más relevantes para el desarrollo de tecnologías sostenibles orientadas al aprovechamiento integral de residuos agrícolas.(Shorey *et al*., 2024)

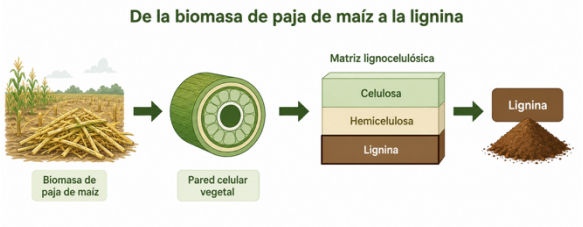


Figura 1. *Del residuo de paja de maíz a la lignina.*
Fuente: Elaboración con IA basado en Dandash et al., 2025.

La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. De estos componentes, la lignina representa entre 18 y 35 % de la masa total dependiendo de la especie vegetal y de las condiciones de crecimiento. (*Figura 1*) Además, constituye la principal fuente renovable de estructuras aromáticas disponibles en la naturaleza, característica que la convierte en una materia prima de gran interés para la obtención de materiales funcionales, productos químicos y adsorbentes ambientales. Se estima que la biosfera contiene aproximadamente 300 mil millones de toneladas de lignina y que cada año se generan millones de toneladas adicionales como subproducto de las industrias papelera, forestal y de biocombustibles.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Sin embargo, solamente una pequeña fracción es aprovechada para aplicaciones de valor agregado, mientras que la mayor parte continúa siendo utilizada como combustible de bajo valor energético.(Mateo *et al*., 2025)

La estructura química de la lignina se encuentra formada por unidades fenólicas derivadas de los alcoholes *p*-cumarílico, coniferílico y sinapílico, las cuales se encuentran unidas mediante una red tridimensional altamente ramificada.(*Figura 2)* Esta arquitectura molecular le confiere estabilidad química, resistencia a la biodegradación y una elevada densidad de grupos funcionales tales como hidroxilos fenólicos, hidroxilos alifáticos, grupos carbonilo, grupos metoxilo y grupos carboxilo. La presencia de estos grupos funcionales ha permitido explorar múltiples rutas de modificación química encaminadas a incrementar sus propiedades fisicoquímicas y ampliar sus aplicaciones industriales y ambientales. Durante los últimos años, el interés científico ha migrado desde la simple extracción de lignina hacia su funcionalización selectiva para la generación de materiales con propiedades específicas, incluyendo catalizadores, materiales compuestos, recubrimientos inteligentes, nanomateriales y adsorbentes para tratamiento de aguas

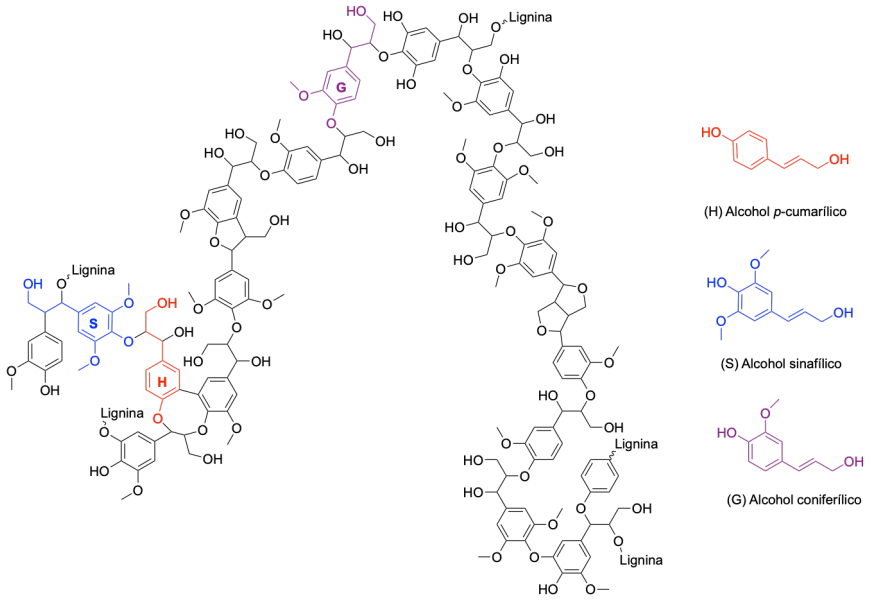


Figura 2*. Estructura química de la lignina y de sus monómeros (G) alcohol coniferílico, (S) alcohol sinapílico y (H) alcohol p-cumarílico. (Libretti et al., 2026).*

La revalorización de lignina se ha consolidado como una de las estrategias prioritarias dentro del concepto moderno de la revalorización, pues a diferencia de los enfoques tradicionales centrados únicamente en la producción de energía, existe una tendencia a emplear la lignina como una herramienta para la remediación ambiental. (Srivastava *et al*., 2026) Dentro de las aplicaciones ambientales de mayor interés destaca el empleo de lignina modificada para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales.

La adsorción ha sido reconocida como una de las tecnologías más eficientes para el tratamiento de efluentes contaminados debido a su bajo costo operativo, simplicidad de diseño, elevada eficiencia y posibilidad de regeneración de los materiales adsorbentes. (*Figura 3*) No obstante, la capacidad de adsorción de la lignina sin modificar suele encontrarse limitada por la cantidad y accesibilidad de los grupos funcionales disponibles para interactuar con especies metálicas disueltas, lo que ha motivado el desarrollo de estrategias de funcionalización orientadas a incrementar su desempeño. Entre las modificaciones más estudiadas se encuentran procesos funcionalización con compuestos heterocíclicos ricos en nitrógeno, los cuales generan nuevos sitios activos capaces de participar en fenómenos de adsorción y complejación metálica. (Libretti *et al*., 2024).

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx



***Figura 3**. Reintegración a la economía circular de un residuo de paja de maíz.*
Fuente: Elaboración propia basada en IA, 2026.

La presencia de metales pesados en cuerpos de agua representa uno de los principales desafíos ambientales debido a su elevada persistencia, movilidad y capacidad de bioacumulación a lo largo de las cadenas tróficas. A diferencia de otros contaminantes, los metales no son biodegradables y pueden permanecer durante largos periodos en los ecosistemas acuáticos, donde sufren procesos de transformación química que modifican su biodisponibilidad y toxicidad. Entre los contaminantes metálicos de mayor preocupación se encuentran el cadmio (Cd), el plomo (Pb) y el cromo (Cr), los cuales son liberados al ambiente por actividades como la minería, la metalurgia, la industria de galvanoplastia, la fabricación de pigmentos, curtidurías, producción de baterías, fertilizantes fosfatados y diversas actividades manufactureras. (B. Wang *et al*., 2020; J. Wang *et al*., 2020) Este trabajo de presenta una comparación entre la lignina sin modificar y la lignina modificada con tetrazol como materiales adsorbentes de metales pesados. A partir de ensayos con cadmio, níquel, plomo y cromo, se analiza cómo la modificación química tiene el potencial mejorar la eficiencia de remoción y aumentar el valor ambiental y económico de un residuo agrícola regional.



***Figura 4**. Estructura química del tetrazol.*
Fuente: Elaboración propia, 2026.

Los tetrazoles son compuestos heterocíclicos de cinco miembros con cuatro átomos de nitrógeno y uno de carbono, lo que los convierte en los heterociclos estables con mayor contenido de nitrógeno conocidos. (*Figura 4*) Estos compuestos no existen de forma natural y deben sintetizarse; estos núcleos poseen una estabilidad térmica y química excepcionales, además que el núcleo del tetrazol funciona como ligando versátil en química de coordinación, permitiendo modificar la reactividad y selectividad de centros metálicos en catalizadores y materiales energéticos. Su síntesis se ha beneficiado enormemente del desarrollo de la química *click*, facilitando la preparación de derivados con propiedades de diseño para aplicaciones específicas. En el ámbito ambiental, los tetrazoles y sus derivados se emplean en el tratamiento de aguas residuales y la adsorción de metales pesados, aprovechando su capacidad de coordinación con iones metálicos tóxicos, también existen reportes que describen su uso como inhibidor de corrosión verde para acero al carbono. (Aromí *et al*., 2011; Shweta & Jha, 2016; Zhang *et al*., 2023).

La estrategia de funcionalizar biopolímeros con grupos tetrazol se contextualiza en una línea más amplia de valorización de biomasa residual para producir adsorbentes de bajo costo mediante la introducción de grupos funcionales con átomos de nitrógeno, oxígeno y azufre que mejoran la afinidad por metales pesados. La lignina, por su estructura aromática tridimensional y sus grupos fenólicos e hidroxilo, constituye una matriz prometedora para la incorporación de tetrazoles, combinando la abundancia y biodegradabilidad del biopolímero con la elevada capacidad quelante del heterociclo.(Santander *et al*., 2021).

Metodología

Origen de la biomasa

Para la extracción de la lignina se emplearon residuos de paja de maíz que proviene del municipio de Manuel Doblado, Gto., específicamente, las coordenadas de ubicación son (20°45′08.30″N 101°56′07.31″O). La cual fue pulverizada hasta alcanzar un tamaño de partículas de 20 mallas.

Extracción de lignina

La metodología de extracción de lignina se denomina deslignificación alcalina y fue optimizada en la fase previa de este trabajo durante el XXIX Verano de la Ciencia (Alvarado Villafan *et al*., 2024). Se añaden 10 g de paja de maíz (20 mallas) en un matraz de fondo redondo de 250 mL y se le adicionan 100 mL de agua para hidratar la biomasa. Posteriormente se adicionan 20 mL de una solución NaOH 10 % m/V y se coloca la mezcla en un sonicador Branson en ciclos de 30 minutos de ultrasonido a temperatura ambiente hasta observar la formación de líquido oscuro. Una vez que se forma el licor negro, la mezcla se somete a filtración para separar la celulosa y hemicelulosa de la lignina solubilizada. La fracción líquida se acidifica con H_2SO_4 1.0 *M* hasta observar precipitación de la lignina, esta mezcla se centrifuga durante 30 minutos a 3000 rpm, posteriormente se aísla el sólido, se enjuaga con agua y posteriormente con metanol, el sólido se seca en una estufa durante 4 horas a 65 ºC, finalmente, se mide la masa obtenida y se caracteriza por espectroscopía de infrarrojo (FTIR). (*Figura 5*).

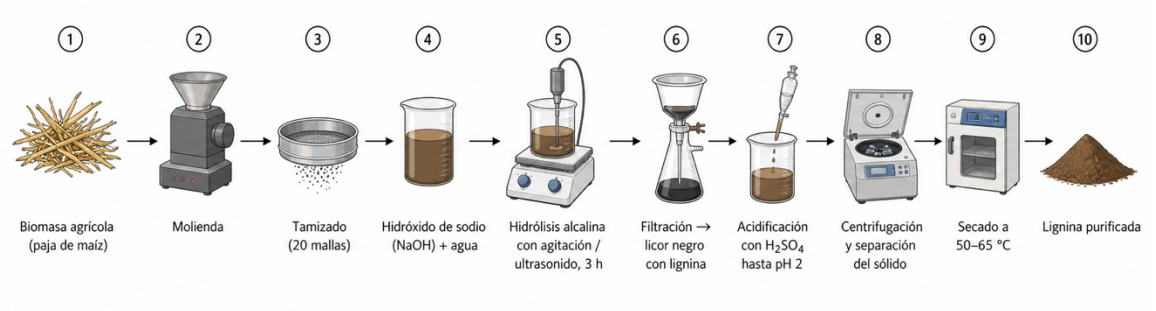


Figura 5. Metodología para la extracción de lignina, mediante deslignificación alcalina.
Fuente: Elaboración propia basada en IA, 2026.

Modificación estructural de lignina

La funcionalización de la lignina ocurre mediante la incorporación de núcleos de tetrazol, siguiendo la metodología reportada por nuestro grupo en 2024 (Alvarado Villafan *et al*., 2024). La ruta sintética consta de dos etapas para lograr la funcionalización de los grupos hidroxilo fenólicos en la lignina. En la primera etapa, se añade 1.0 g de lignina pulverizada y se coloca en agitación con acrilonitrilo durante 3 h a temperatura ambiente, el precipitado se aísla, se lava con agua y etanol, y se seca a 65 °C. En la segunda etapa, este derivado cianoetilado se emplea como sustrato para la formación del núcleo de tetrazol, tratándolo con cloruro de amonio NH_4Cl y azida de potasio KN_3 en dimetilformamida DMF a 80 °C durante 1 h; el sólido resultante se lava con agua y se seca nuevamente a 65 °C para su posterior caracterización. (*Figura 6*).

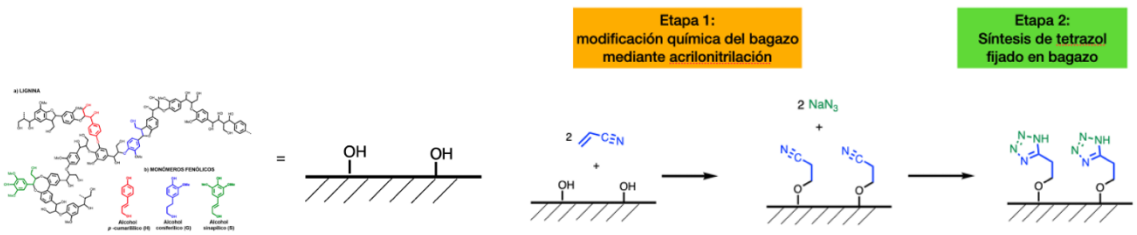


Figura 6. Propuesta de funcionalización de la lignina.
Fuente: Elaboración propia, 2026.

Pruebas de adsorción de metales pesados en lignina y en tetrazol-lignina

Se preparan 100 mL de soluciones diluidas de metales pesados, a una concentración aproximada de 0.8mM de cadmio Cd, plomo Pb y cromo Cr. A cada solución se le adicionan 250 mg de lignina y se ajusta el *p*H de la solución a 5, se colocan en agitación constante durante 3 horas hasta el equilibro de adsorción. (Chen *et al*., 2020) Al término del tiempo de contacto lignina-metal, se filtra la lignina con metal pesado y se aísla el líquido remanente para la cuantificación de los metales pesados remanentes en cada solución. Para el caso de la prueba de adsorción con tetrazol lignina se siguen los mismos parámetros anteriores.

Resultados

Bajo la metodología descrita se obtuvo una extracción de lignina de un 12% con respecto de la masa de paja de maíz original. El uso del ultrasonido con la solución alcalina y lignina permitió alcanzar la formación del licor negro, alcanzando el rendimiento del 12% en 30 minutos a temperatura ambiente, lo cual es un resultado comparable a los reportado en la literatura con la ventaja de la optimización del tiempo de reacción. (Serafín Muñoz *et al*., 2019)

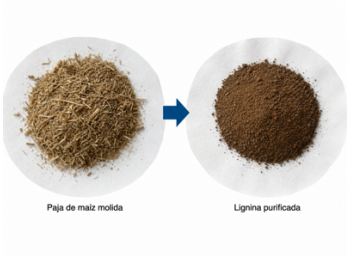


Figura 7. *Comparativa de texturas de paja de maíz molido vs lignina extraída.*
Fuente: Elaboración propia, 2026.

Se caracterizó cualitativamente mediante FTIR a la lignina extraída para garantizar la presencia de los grupos funcionales de nuestro interés para el proceso de adsorción. Esta técnica espectroscópica denominada Transformada de Fourier Infrarroja nos permite evaluar la composición de la muestra identificando los grupos funcionales orgánicos presentes y específicamente comparando la muestra de lignina experimental con una muestra patrón de lignina comercial. El hardware que se usó para el infrarrojo fue un Perkin Elmer Spectrum Two con el dispositivo ATR (Reflexión Total Atenuada), así mismo el procesamiento de los datos obtenidos se realizó con el software Spectragryph versión 1.2. (Menges, 2022)

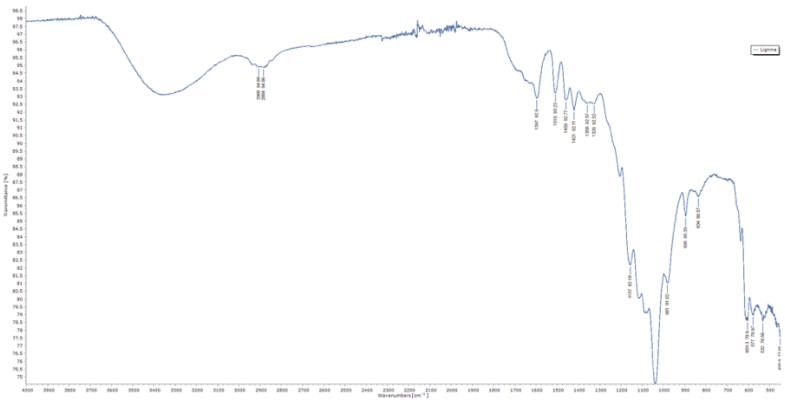


Figura 8. *Espectro FTIR de la lignina extraída.*
Fuente: Elaboración propia con Spectragryph de Menges, 2022.

El espectro FTIR de la Figura 8, confirma el patrón de grupos funcionales típico de ligninas técnicas. La banda ancha de –OH en 3358 cm^{-1} es consistente con una elevada densidad de grupos hidroxilo fenólicos y alifáticos, los cuales son relevantes para los procesos posteriores de funcionalización química y para su interacción con otras matrices. La banda de estiramiento C–H a 2924 cm^{-1}, en conjunto con las bandas aromáticas a 1595, 1511 y 1422 cm^{-1}, respalda la presencia de un esqueleto aromático condensado derivado de las unidades monoméricas de lignina. La señal a 1737 cm^{-1} sugiere la existencia de funcionalidades carboxílicas alifáticas, posiblemente asociadas a grupos éster o carboxílicos formados o enriquecidos durante el proceso de extracción. Además, las bandas a 1116 y 1038 cm^{-1}, asignadas al estiramiento C–O, hacen suponer que existe una fracción importante de grupos éter y alcohol, lo que es coherente con una red de lignina parcialmente conservada. (Espinoza-Acosta *et al*., 2022). En conjunto, estas características indican que el material extraído mantiene las características estructurales fundamentales de la lignina.

La lignina extraída conserva grupos funcionales capaces de interactuar con cationes metálicos, pero su capacidad adsorbente natural puede ser limitada. Por tal motivo se desarrolló la funcionalización química de los grupos -OH para sustituirlos por una cadena alifática que en un extremo contiene un núcleo de tetrazol. El espectro de FTIR (*Figura 9*) indica que, posterior a la inclusión del tetrazol, aún hay presencia de grupos -OH que no se han funcionalizado completamente, pero también muestra una intensificación en la señal en 2920 cm^{-1} que se debe a la vibración de estiramiento C-H del grupo metileno presente en la nueva cadena alifática que conecta al O de eter con el tetrazol. Además se observan señales caracteristicas del anillo nitrogenado como picos a 1480 cm^{-1} junto a una señal intensa en 1390 cm^{-1}correspondientes a las vibraciones de estiramiento y flexión C=N del característico anillo tetrazol. Además hay una señal en 1036 cm^{-1} que se atribuye a una deformación del enlace C-O.

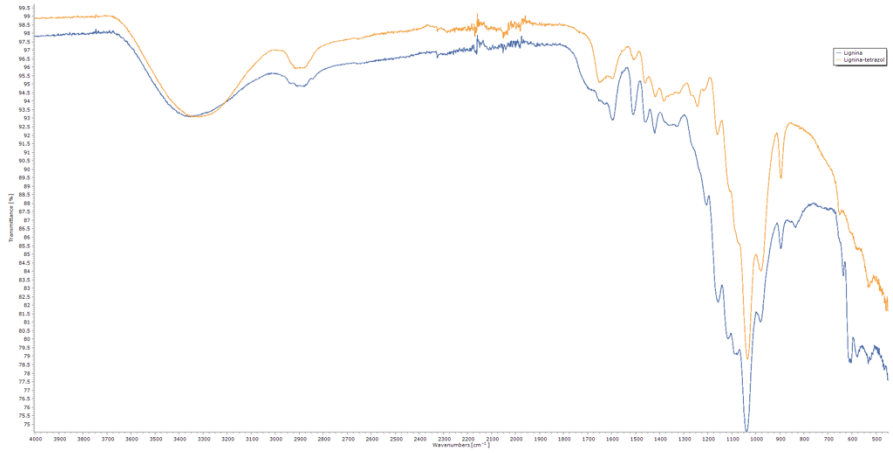


***Figura 9**. Espectros FTIR de la lignina extraída (naranja) comparada con lignina modificada con tetrazol(azul).*
Fuente: Elaboración propia con Spectragryph de Menges, 2022.

Como resultados en las pruebas de adsorción de metales pesados con lignina, se llevaron a cabo bajo las condiciones de 3 horas de agitación a pH 5, se prepararon soluciones de aproximadamente 0.8 mM de Cd^{+2}, Pb^{+2} y Cr^{+3}, equivalentes a 90, 165.8 y 41.6 ppm, respectivamente. (*Figura 10*).



***Figura 10**. Soluciones de metales pesados en contacto con material adsorbentes derivados de lignina.*

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Después del tratamiento con lignina y del posterior aislamiento de la solución remanente, las concentraciones remanentes en las soluciones se analizaron por absorción atómica, donde se encontraron los siguientes resultados: 52 ppm para Cd^{+2}, 95 ppm para Pb^{+2} y 34 ppm para $C^{+3}r$. A partir de esos datos, los porcentajes de remoción con lignina fueron de 42.2 % para Cd^{+2}, 42.7 % para Pb^{+2} y 18.3 % para Cr^{+3}. Considerando un volumen de trabajo de 100 mL de solución y 0.25 g de lignina como adsorbente, las capacidades de adsorción calculadas fueron 15.2 mg/g para Cd^{+2}, 28.3 mg/g para Pb^{+2} y 3.0 mg/g para Cr^{+3}.

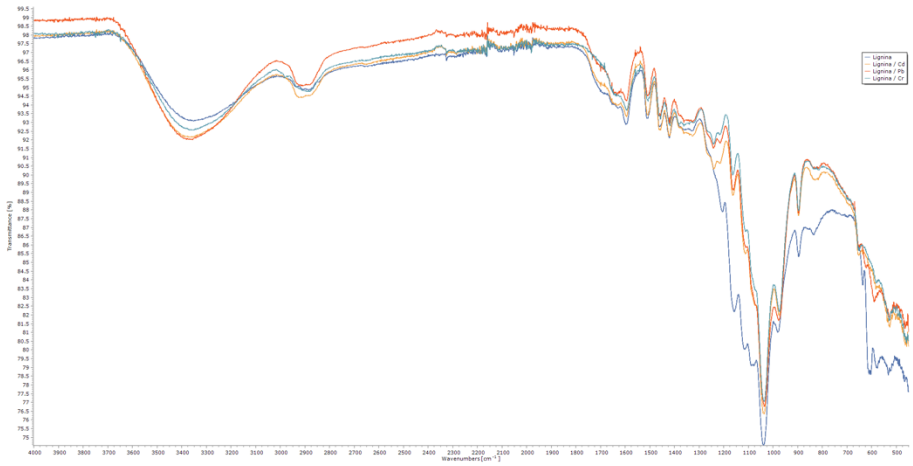


Figura 11. Espectros FTIR de la lignina extraída comparada con lignina con Cd, Pb y Cr.
Fuente: Elaboración propia con Spectragryph de Menges, 2022.

La Tabla 1 permite ver una tendencia clara de la lignina sin modificar ya que muestra afinidad apreciable por Pb^{+2} y Cd^{+2}, pero un desempeño más discreto para Cr^{+3}.

***Tabla 1**. Desempeño comparado de concentraciones de metales en solución en ensayo con lignina.*

Metal	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)	Remoción con lignina (ppm)	*q* con lignina (mg/g)
Cd^{+2}	90	52	42.2%	15.2
Pb^{+2}	166	95	42.7%	28.3
Cr^{+3}	42	34	18.3%	3.0

Los reportes en la literatura han señalado que la incorporación de nuevos grupos funcionales con átomos donadores, como nitrógeno u oxígeno, incrementa la afinidad por metales pesados y mejora la eficiencia de remoción. (Chen *et al*., 2020). En una prueba adicional realizada con lignina modificada con tetrazol bajo los mismos parámetros experimentales, la concentración remanente de Cr^{+3} fue 17 ppm a partir de una solución inicial de 41.6 ppm. Esto corresponde a una remoción de 59.1 % y a una capacidad de adsorción (*q*) de 9.84 mg/g, un resultado claramente superior al observado para la lignina sin modificar en el mismo metal.

***Tabla 2**. Desempeño de concentraciones de cromo (III) en solución en ensayo con lignina-tetrazol*

Metal	Concentración inicial (ppm)	Concentración final (ppm)	Remoción con lignina-tetrazol	*q* con lignina-tetrazol (mg/g)
Cr^{+3}	42	17	59.1	9.84

En la Tabla 2, se observa que la modificación a lignina-tetrazol mejora de forma notable la captura de Cr, elevando la capacidad q de 3.0 a 9.84 mg/g frente a la lignina sin modificar bajo las mismas condiciones.

Desde una perspectiva ambiental de revalorización de residuos, la cuestión más relevante es determinar si la lignina como extracto de un residuo, actúa de manera eficiente como material adsorbente. Pero, además, es importante establecer cuánto valor se gana cuando se modifica químicamente. La lignina extraída tiene como origen una materia prima prácticamente sin valor y abundante en la región, que puede aumentar su valor de apreciación debido a una serie de procesos químicos para reintegrarle a una cadena de valor.

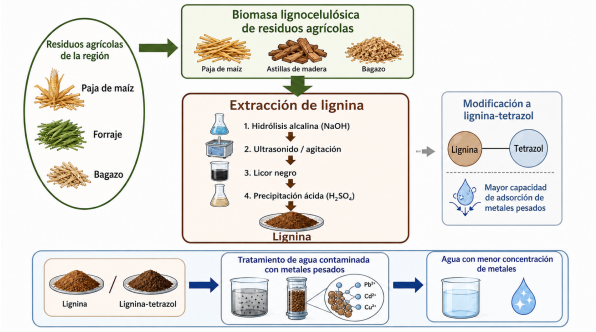


Figura 12. Estrategia para valorizar la biomasa.
Fuente: Elaboración propia basada en IA, 2026.

Comparativamente, la lignina con tetrazol requiere de dos etapas adicionales en su proceso, por lo que el costo de preparación aumenta. Sin embargo, el resultado preliminar de remoción de cromo permite inferir una mayor capacidad de adsorción que puede compensar el costo adicional. Si este material puede remover más metal por cada gramo de adsorbente, entonces puede reducir la cantidad total de sólido requerida, el volumen de residuos generados y el costo por masa de contaminante retirado. La revalorización química de la lignina produce un material estructuralmente más complejo y a su vez, también un candidato más competitivo para aplicaciones de saneamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Esta estrategia sigue la lógica de la economía circular, pues se tiene un residuo agrícola abundante en la región que puede convertirse en un material funcional para atender problemas ambientales relevantes, como la presencia de metales pesados en aguas impactadas por actividades agrícolas, urbanas o minero-metalúrgicas.

Conclusión

La lignina extraída de la paja de maíz es un producto valorizable proveniente de la biomasa como residuo. Los resultados muestras que, aun sin modificar, puede remover cantidades apreciables de plomo y cadmio, mientras que su funcionalización con tetrazol mejora de manera importante la adsorción de cromo. El principal valor de este trabajo está en la posibilidad de transformar un residuo agrícola local en un material ambientalmente útil y con valor agregado. En ese sentido, la revalorización de la lignina ofrece un ejemplo promisorio de cómo la revalorización puede surgir desde el aprovechamiento inteligente de los residuos.

Agradecimientos

El grupo de investigación agradece los apoyos recibidos para el desarrollo de este proyecto: A Veranos UG, a la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado. A la División de Ingenierías por los consumibles suministrados y la infraestructura disponible. A la Dra. Alma Hortensia Serafín Muñoz, responsable del Laboratorio de Ambiental II por las nutritivas discusiones y la infraestructura del laboratorio. Al Laboratorio de Evaluación Toxicológica y Riesgos Ambientales (LETRA) a cargo de Dr. Gustavo Cruz Jiménez de la DCNE por la espectrofotometría de infrarrojo. A la Dra. Norma Leticia Gutiérrez Ortega responsable del Laboratorio de Ambiental III por las facilidades otorgadas en la espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis). Al desarrollador F. Menges creador del software para el tratamiento del FTIR "Spectragryph - optical spectroscopy software", Version 1.2.16.1, 2023, http://www.effemm2.de/spectragryph/ bajo la licencia gratuita en el uso del software *Spectragryph* para el tratamiento de los espectros de infrarrojo.

Referencias

Alvarado Villafan, A. C., Barrientos Rico, Z. V., Cerrito Florencio, B. C., Huerta Delgado, J. J., Morales Hernández, H. S., Rico Velázquez, P. J., & Cano, P. A. (2024). Revalorización de lignina (Fase III). Síntesis de material adsorbente derivado de Lignina-tetrazol. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, *28*, 1–11. https://doi.org/10.15174/jc.2024.4575

Aromí, G., Barrios, L. A., Roubeau, O., & Gamez, P. (2011). Triazoles and tetrazoles: Prime ligands to generate remarkable coordination materials. *Coordination Chemistry Reviews,* 255,(5–6), 485–546. https://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.10.038

Chen, Y., Zhao, W., Zhao, H., Dang, J., Jin, R., & Chen, Q. (2020). Efficient removal of Pb(II), Cd(II), Cu(II) and Ni(II) from aqueous solutions by tetrazole-bonded bagasse. *Chemical Physics*, *529*, 110550. https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2019.110550

Dandash, A. A., Abu-Jdayil, B., & Tannous, J. H. (2025). Lignin Extraction from Various Biomass Sources: A Comprehensive Review of Characteristics, Applications, and Future Prospects. *The Chemical Record*, *25*(8). https://doi.org/10.1002/tcr.202500045

Espinoza-Acosta, J. L., Montaño-Leyva, B., Valencia-Rivera, D. E., Ledesma-Osuna, A. I., & Vega-Rios, A. (2022). Extracción, caracterización y actividad antioxidante de lignina de lirio acuático (Eichhornia crassipes) y cáscara de nuez pecanera (Carya illinoinensis). *Biotecnia*, *24*(2), 94–103. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i2.1642

Libretti, C., Correa, L. S., & Meier, M. A. R. (2026). Correction: From waste to resource: advancements in sustainable lignin modification. *Green Chemistry*, *28*(17), 7537–7537. https://doi.org/10.1039/D6GC90077A

Libretti, C., Santos Correa, L., & Meier, M. A. R. (2024). From waste to resource: advancements in sustainable lignin modification. *Green Chemistry*, *26*(8), 4358–4386. https://doi.org/10.1039/D4GC00745J

Mateo, S., Fabbrizi, G., & Moya, A. J. (2025). Lignin from Plant-Based Agro-Industrial Biowastes: From Extraction to Sustainable Applications. *Polymers*, *17*(7), 952. https://doi.org/10.3390/polym17070952

Menges, F. (2022). *Spectragryph - optical spectroscopy software. Version 1.2.16.1*. https://www.effemm2.de/spectragryph/index.html

Santander, P., Butter, B., Oyarce, E., Yáñez, M., Xiao, L. P., & Sánchez, J. (2021). Lignin-based adsorbent materials for metal ion removal from wastewater: A review. *Industrial Crops and Products*, *167*. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113510

Serafín Muñoz, A. H., Molina Guerrero, C. E., Gutierrez Ortega, N. L., Leal Vaca, J. C., Alvarez Vargas, A., & Cano Canchola, C. (2019). Characterization and Integrated Process of Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Straw. *Waste and Biomass Valorization*, *10*(7), 1857–1871. https://doi.org/10.1007/s12649-018-0218-9

Shorey, R., Salaghi, A., Fatehi, P., & Mekonnen, T. H. (2024). Valorization of lignin for advanced material applications: a review. *RSC Sustainability*, 2(4), 804–831. Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/d3su00401e

Shweta, K., & Jha, H. (2016). Synthesis and characterization of crystalline carboxymethylated lignin-TEOS nanocomposites for metal adsorption and antibacterial activity. *Bioprocess*, *3*, 31. https://doi.org/10.1186/s40643-016-0107-7

Srivastava, A. N., Vuppaladadiyam, A. K., Koroth, R. P., Pfeifer, C., Kaviti, A. K., Fathi, J., Maslani, A., Barmavatu, P., Buryi, M., Pohorely, M., & Sikarwar, V. S. (2026). Circular Economy Approaches for Sustainable Waste Management: A Review on Integration of AI, Advanced Technologies and Policy Recommendations. *Recycling*, *11*(6), 99. https://doi.org/10.3390/recycling11060099

Wang, B., Wang, S. F., Lam, S. S., Sonne, C., Yuan, T. Q., Song, G. Y., & Sun, R. C. (2020). A review on production of lignin-based flocculants: Sustainable feedstock and low carbon footprint applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110384

Wang, J., Qian, Y., Li, L., & Qiu, X. (2020). Atomic Force Microscopy and Molecular Dynamics Simulations for Study of Lignin Solution Self-Assembly Mechanisms in Organic–Aqueous Solvent Mixtures. *ChemSusChem*, *13*(17), 4420–4427. https://doi.org/10.1002/cssc.201903132

Zhang, Z., Chen, Y., Wang, D., Yu, D., & Wu, C. (2023). Lignin-based adsorbents for heavy metals. *Industrial Crops and Products*, 193. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116119