

De la naturaleza a la industria: aceites esenciales como alternativa a los preservantes sintéticos para la madera

From nature to industry: essential oils as an alternative to synthetic wood preservatives

Paola Andrea Torres-Andrade¹
Argelys del Valle Márquez Márquez²
Belkis Sulbarán-Rangel³

ORCID: 0000-0001-6699-8676,
Torres-Andrade, P. A.
ORCID: 0009-0003-8876-0679,
Márquez Márquez, A. D.
ORCID: 0000-0002-5758-6140,
Sulbarán Rangel, B.

1. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad del Cauca.
2. Departamento de Tecnología de Productos Forestales. Universidad de los Andes.
3. Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara.

Torres-Andrade, P. A., Márquez Márquez, A. D. y Sulbarán Rangel, B. (2026). De la naturaleza a la industria: aceites esenciales como alternativa a los preservantes sintéticos para la madera. *Concordia*, 2 (4), 47-59.

Recibido: 29/03/2026
Aprobado: 09/06/2026

Resumen: La madera es un material renovable ampliamente utilizado por sus propiedades mecánicas; sin embargo, su durabilidad se ve afectada por la degradación biológica causada por hongos, insectos y bacterias. Tradicionalmente, se han empleado compuestos sintéticos para su protección, aunque estos presentan riesgos ambientales y para la salud. En este contexto, esta revisión analiza el potencial de los aceites esenciales como alternativa sostenible para la protección de la madera, abordando sus mecanismos antifúngicos, ventajas, limitaciones y perspectivas de mejora. Entre los principales desafíos se encuentran su volatilidad, oxidación, lixiviación y limitada penetración en la matriz lignocelulósica. Para superar estas limitaciones, se han propuesto estrategias como la nanoencapsulación, la modificación química y la incorporación en matrices poliméricas y biomateriales sostenibles, con el fin de mejorar su estabilidad, retención y eficacia. Los aceites esenciales representan una alternativa prometedora, aunque su aplicación industrial dependerá del desarrollo de formulaciones más estables y eficientes.

Palabras clave: Hongos de pudrición; biopreservantes; actividad antifúngica; materiales lignocelulósicos; sostenibilidad.

Abstract: Wood is a renewable material widely used for its mechanical properties; however, its durability is affected by biological degradation caused by fungi, insects, and bacteria. Traditionally, synthetic compounds have been used for its protection, although these present environmental and health risks. In this context, this review analyzes the potential of essential oils as a sustainable alternative for wood protection, addressing their antifungal mechanisms, advantages, limitations, and prospects for improvement. Among their main challenges are volatility, oxidation, leaching, and limited penetration into the lignocellulosic matrix. To overcome these limitations, strategies such as nanoencapsulation, chemical modification, and incorporation into polymer matrices and sustainable biomaterials have been proposed to improve their stability, retention, and efficacy. Essential oils represent a promising alternative, although their industrial application will depend on the development of more stable and effective formulations.

Keywords: Rot fungi; biopreservatives; antifungal activity; lignocellulosic materials; sustainability

Introducción

La madera se ha utilizado ampliamente en sectores como la construcción, la fabricación de mobiliario y la producción de celulosa para papel, debido a sus propiedades químicas, físicas y mecánicas (Papola et al., 2025; van Nimwegen & Latteur, 2023). Desde el punto de vista estructural, la madera es un biomaterial compuesto principalmente por polímeros orgánicos como celulosa, hemicelulosas y lignina (Mai & Zhang, 2023). Estos componentes determinan sus propiedades físicas y mecánicas, pero también la hacen vulnerable a procesos de degradación biológica, especialmente por la acción de hongos, insectos y bacterias (Sovakov & Horbachova, 2025).

Entre estos agentes, los hongos desempeñan un papel predominante debido a su capacidad enzimática para degradar los componentes de la madera, afectando su resistencia y vida útil. Las industrias madereras han recurrido tradicionalmente a tratamientos químicos sintéticos de alta eficacia, como la creosota, el pentaclorofenol y compuestos basados en arseniato de cobre cromatado, para contrarrestar el efecto de los organismos degradadores (Hasan et al., 2010; Papola et al., 2025). No obstante, la toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación de estos tratamientos impactan negativamente el medio ambiente y la salud humana, incluyendo la contaminación de suelos y cuerpos de agua, por lo que han sido objeto de restricciones regulatorias en varios países (Morais et al., 2021).

En respuesta a estas problemáticas, ha surgido un creciente interés por alternativas más sostenibles y ambientalmente responsables para proteger la madera, entre las cuales destacan los compuestos de origen natural, como extractos, metabolitos secundarios y aceites esenciales (Broda, 2020; Woźniak, 2022). Estos compuestos han mostrado actividad antifúngica contra hongos degradadores y un menor impacto ambiental, posicionándolos como candidatos potenciales en el desarrollo de biopreservantes (Bessike et al., 2023; de Camargo et al., 2026; du Plooy et al., 2009; Woźniak 2022).

Aunque los compuestos naturales presentan un potencial prometedor para la protección de la madera, persisten desafíos relacionados con su estabilidad, eficacia, aplicación a escala industrial y regulación (van Nimwegen & Latteur, 2023), lo que limita su implementación en condiciones reales. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es analizar el estado del arte sobre el uso de aceites esenciales en la protección de la madera como alternativa a los fungicidas sintéticos tradicionales, abordando sus mecanismos de acción, ventajas, limitaciones y perspectivas futuras, con énfasis en su contribución a sistemas más sostenibles.

Metodología

Se realizó una revisión narrativa y crítica de literatura científica enfocada en el uso de aceites esenciales como alternativa sostenible para la protección de la madera frente a organismos degradadores. La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en bases de datos como ScienceDirect, Scopus y Google Scholar, mediante combinaciones de términos clave: *essential oils wood protection*, *natural wood preservatives*, *antifungal activity essential oils*, *wood decay fungi*, *bio-based wood preservatives* y *essential oil encapsulation wood*. Se incluyeron artículos publicados principalmente entre 2010 y 2026, en idioma inglés, relacionados con actividad antifúngica, mecanismos de acción, limitaciones técnicas y estrategias de mejora.

La selección de documentos consideró criterios de pertinencia temática, calidad metodológica, disponibilidad del texto completo y relevancia de los resultados experimentales o revisiones especializadas. La información recopilada se organizó de acuerdo con tipos de aceites esenciales y compuestos bioactivos, hongos evaluados, ventajas y limitaciones de aplicación, así como estrategias emergentes de mejora.

Las figuras conceptuales incluidas en el manuscrito fueron elaboradas con apoyo de herramientas de inteligencia artificial generativa (ChatGPT, versión GPT 5, OpenAI, 2026). No obstante, la selección de información científica, organización conceptual, validación del contenido y revisión final de las ilustraciones fueron realizadas por los autores, garantizando precisión, coherencia y pertinencia académica.

Aceites esenciales: una alternativa inspirada en la naturaleza

Los aceites esenciales son mezclas complejas de compuestos orgánicos volátiles producidos por diversas especies de plantas como parte de sus mecanismos naturales de defensa ante condiciones de estrés y presencia de patógenos. Estos compuestos incluyen terpenos, alcoholes, aldehídos, fenoles y cetonas (Deng et al., 2025), con actividad antimicrobiana mediante mecanismos como la alteración de membranas celulares y la inhibición de procesos metabólicos (Figura 1). Debido a estas propiedades, los aceites esenciales han sido investigados en aplicaciones como conservación de alimentos, control de patógenos agrícolas y protección de materiales lignocelulósicos (du Plooy et al., 2009). En este último caso, su relevancia radica en su capacidad para inhibir el crecimiento de hongos responsables de la degradación de la madera.

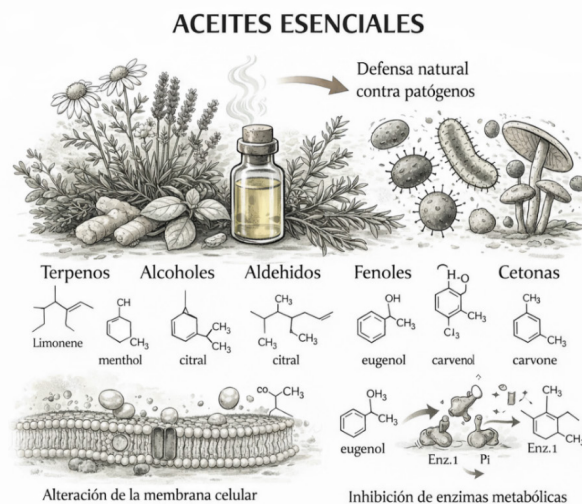


Figura 1. Representación de los componentes de los aceites esenciales y su acción contra patógenos.
Elaboración propia con apoyo de ChatGPT versión GPT-5(OpenAI 2026).

Los hongos son los principales causantes de la degradación de la madera, y pueden clasificarse como hongos de pudrición blanca, pudrición café y pudrición suave, según su mecanismo de degradación. Esta clasificación resulta fundamental para comprender la eficacia diferencial de los tratamientos, ya que cada tipo de hongo afecta distintos componentes de la madera. Los hongos de pudrición blanca degradan simultáneamente lignina, celulosa y hemicelulosa mediante sistemas enzimáticos ligninolíticos, lo que produce una pérdida de lignina y una apariencia blanquecina y fibrosa de la madera. Especies como *Trametes versicolor*, *Trametes hirsuta* y *Phanerochaete chrysosporium* se utilizan como modelos experimentales en estudios sobre la actividad antifúngica de compuestos naturales, incluidos aceites esenciales y extractos de plantas (Broda 2020; Woźniak 2022; Xie et al. 2017).

En contraste, los hongos de pudrición café degradan principalmente la celulosa y hemicelulosas, sin afectar significativamente la lignina, lo que genera oscurecimiento y patrones cúbicos en la madera. Entre las especies representativas de este grupo se encuentran *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum*, *Postia placenta* y *Serpula lacrymans*, que se utilizan ampliamente en ensayos de laboratorio para evaluar la resistencia de la madera y la eficacia de agentes protectores (Broda 2020; Woźniak 2022). En la Tabla 1 se muestra algunos aceites esenciales de diferentes especies, sus compuestos bioactivos principales y los hongos evaluados en estudios antifúngicos.

Especie vegetal (aceite esencial)	Compuestos activos principales	Hongos evaluados	Referencias
<i>Cinnamomum spp.</i> (canela)	Cinamaldehído	<i>Trametes hirsuta</i> , <i>Laetiporus sulphureus</i>	(Woźniak 2022; Xie et al. 2017)
<i>Cuminum cyminum</i> (-comino)	Cuminaldehído	<i>Coniophora puteana</i> , <i>Trametes versicolor</i>	(Broda 2020)
<i>Cymbopogon citratus</i> (limoncillo)	Citral	<i>Gloeophyllum trabeum</i> , <i>Rhodonía placenta</i> , <i>Trametes versicolor</i>	(Woźniak, 2022; Xie et al., 2017)
<i>Cymbopogon spp.</i> (citronela)	Citronelal, geraniol	Hongos degradadores de madera	(Woźniak 2022)
<i>Eucalyptus spp.</i> (eucalipto)	1,8-cineol, citronelal	Hongos de pudrición y mohos	(Broda 2020; Woźniak 2022)
<i>Foeniculum vulgare</i> (hinojo)	Anetol	<i>Trametes versicolor</i>	(Broda 2020)
<i>Lavandula angustifolia</i> (lavanda)	Linalool, acetato de linalilo	<i>Trametes versicolor</i> , <i>Coniophora puteana</i> , <i>Chaetomium globosum</i>	(Woźniak 2022)
<i>Melaleuca alternifolia</i> (árbol de té)	Terpinen-4-ol	<i>Gloeophyllum trabeum</i> , <i>Rhodonía placenta</i> , <i>Trametes versicolor</i> , mohos	(Woźniak 2022)
<i>Mentha piperita</i> (menta)	Mentol, mentona	<i>Trametes versicolor</i> , mohos	(Woźniak 2022)
<i>Ocimum basilicum</i> (albahaca)	Linalool, estragol	<i>Trametes versicolor</i> , <i>Coniophora puteana</i>	(Broda 2020)
<i>Origanum vulgare</i> (orégano)	Carvacrol, timol	<i>Trametes versicolor</i> , <i>Coniophora puteana</i>	(Broda 2020; Woźniak 2022)

<i>Pimpinella anisum</i> (anís)	trans-anetol	<i>Coniophora puteana</i> , <i>Trametes versicolor</i>	(Broda 2020)
<i>Syzygium aromaticum</i> (clavo)	Eugenol	<i>Gloeophyllum trabeum</i> , <i>Trametes versicolor</i> , mohos	(Broda 2020; Woźniak 2022)
<i>Thymus vulgaris</i> (tomillo)	Timol, carvacrol	<i>Trametes versicolor</i> , <i>Coniophora puteana</i>	(Broda 2020; Woźniak 2022)

Tabla 1. Aceites esenciales con potencial antifúngico para la protección de la madera

En general, los aceites esenciales presentados en la Tabla 1 provienen de plantas aromáticas pertenecientes a familias como Lamiaceae, Myrtaceae, Apiaceae y Lauraceae, reconocidas por su capacidad de producir metabolitos secundarios con actividad antimicrobiana. Entre los compuestos activos de mayor eficacia se encuentran fenoles como timol, carvacrol y eugenol; aldehídos como cinamaldehído y citral; así como alcoholes terpénicos y terpenos oxigenados, los cuales han sido ampliamente asociados con actividad antifúngica (Leiva-Mora et al., 2025). Los compuestos fenólicos y monoterpenos, como timol, carvacrol y citral, son los principales responsables de dicha actividad, ya que alteran la membrana celular fúngica e inhiben procesos metabólicos esenciales para el desarrollo (Leiva-Mora et al., 2025), limitando el crecimiento de hongos de pudrición blanca y café como *Trametes versicolor*, *Trametes hirsuta*, *Coniophora puteana*, *Rhodonía placenta* y *Gloeophyllum trabeum*. En este contexto, aceites esenciales derivados de *Thymus vulgaris*, *Origanum vulgare* y *Cinnamomum* spp. destacan por su capacidad para inhibir el crecimiento fúngico en condiciones de laboratorio (Xie et al., 2017). La eficacia de estos compuestos depende, en gran medida, de la concentración empleada y del tipo de microorganismo evaluado.

Adicionalmente, otras investigaciones han comenzado a ampliar el uso de los aceites esenciales más allá de su acción antifúngica, explorando su aplicación en la protección de la madera frente a insectos xilófagos. En este sentido, se ha observado que el aceite de lavanda puede mejorar la resistencia de la madera de *Picea abies* frente al ataque de termitas, sin generar cambios significativos en sus propiedades físicas o estéticas (Simunkova et al. 2022). Estos resultados refuerzan la idea de que los aceites esenciales pueden constituir una alternativa viable a los biocidas sintéticos, especialmente cuando se incorporan en sistemas de recubrimiento o tratamientos

que favorecen su estabilidad y permanencia en la madera. Sin embargo, la evidencia disponible proviene en su mayoría de estudios realizados en condiciones controladas, lo que limita su aplicación directa en escenarios reales. En consecuencia, es necesario avanzar en el desarrollo de formulaciones más estables y estrategias de aplicación que permitan trasladar estos resultados al ámbito industrial.

Ventajas y desafíos del uso de aceites esenciales en la protección de la madera

El uso de tratamientos sintéticos para la protección de la madera ha sido ampliamente adoptado debido a su elevada eficacia; sin embargo, su impacto ambiental y los riesgos asociados para la salud humana han impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles. En este contexto, los aceites esenciales emergen como una opción prometedora, no solo por su actividad antifúngica, sino también por su potencial para integrarse en modelos de producción más sostenibles y ambientalmente responsables al ser considerados biopreservantes (Broda, 2020; Woźniak, 2022). Además, su aplicación combina ventajas relacionadas con su bajo impacto ambiental y mecanismos de acción multimodales, aunque aún presenta limitaciones técnicas que condicionan su implementación práctica a escala industrial.

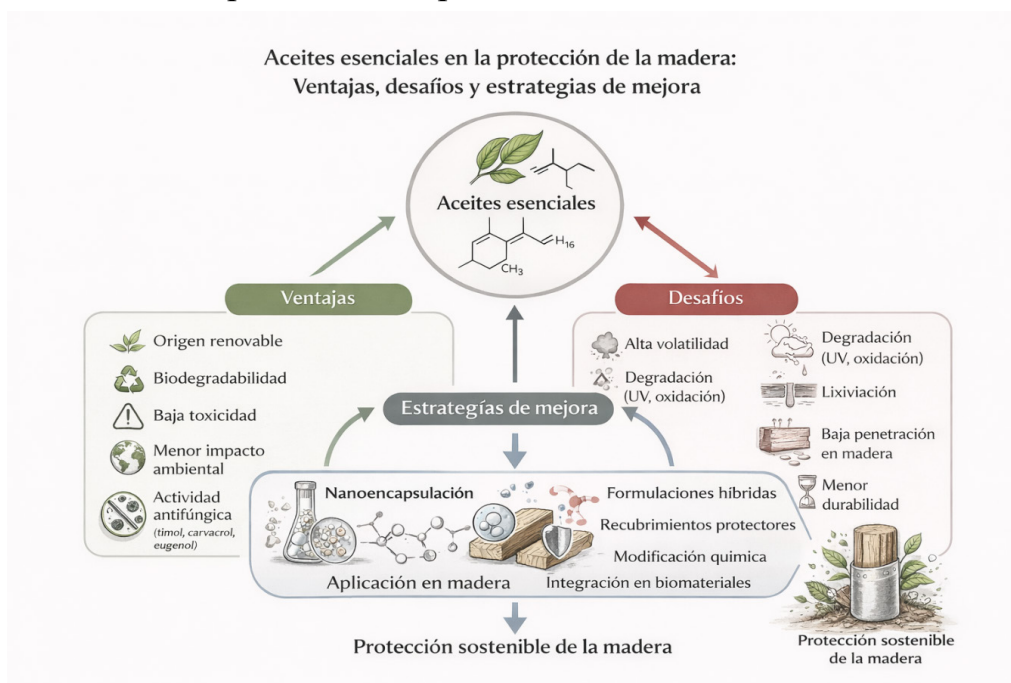


Figura 2. Esquema conceptual sobre las ventajas y desafíos del uso de aceites esenciales como alternativa para la protección de la madera. Elaboración propia con apoyo de ChatGPT versión GPT-5 (OpenAI 2026).

La Figura 2 muestra que una de las principales ventajas de los aceites esenciales es su baja toxicidad a los seres humanos, especialmente en comparación con los conservantes sintéticos ordinarios basados en metales pesados u organoclorados. Entre

sus principales ventajas se encuentra su relativa menor toxicidad en comparación con los preservantes convencionales. Esta característica reduce los riesgos de contaminación ambiental y exposición humana, particularmente en aplicaciones donde la madera está en contacto directo o durante periodos prolongados de uso (Hasan et al. 2010; Morais et al. 2021). Al mismo tiempo, es importante considerar que los extractos de productos naturales pueden presentar niveles de toxicidad comparables a los de los preservantes sintéticos en organismos no objetivo (Morrell 2017). Por otra parte, su carácter biodegradable implica una menor persistencia en el ambiente en comparación con los biocidas sintéticos, lo que contribuye a reducir la bioacumulación y la contaminación de suelos y cuerpos de agua (Hasan et al. 2010; Woźniak 2022).

Asimismo, su origen renovable constituye una ventaja, los aceites esenciales pueden obtenerse a partir de plantas aromáticas o de subproductos agroindustriales, lo que favorece su integración en esquemas de economía circular y en estrategias de aprovechamiento sostenible de recursos (Broda, 2020; Papola et al., 2025). Desde una perspectiva funcional, la complejidad química de los aceites esenciales representa otro beneficio relevante. La presencia de múltiples compuestos bioactivos, como fenoles y terpenos, permite un efecto antifúngico sinérgico y multimodal, lo que dificulta el desarrollo de resistencia por parte de los microorganismos. En este sentido, estos compuestos se diferencian de muchos biocidas sintéticos cuya acción suele dirigirse a mecanismos específicos.

Sin embargo, a pesar de los beneficios asociados al uso de aceites esenciales, su aplicación en la protección de la madera enfrenta desafíos significativos que limitan su adopción a escala industrial. Uno de los principales retos es su alta volatilidad, que reduce su permanencia en el material, especialmente bajo condiciones ambientales adversas como radiación UV, humedad o variaciones térmicas (Broda, 2020; Woźniak, 2022). Asimismo, su susceptibilidad a la oxidación y a la lixiviación afecta su estabilidad y eficacia a largo plazo, particularmente en aplicaciones exteriores. Este efecto se intensifica en ambientes húmedos, donde el contacto con el agua favorece la pérdida del agente protector (Vettraino et al., 2023). Estas limitaciones han sido señaladas previamente, observándose que la eficacia de los biocidas naturales tiende a variar entre condiciones de laboratorio y de campo, debido principalmente a procesos de lixiviación, degradación y a su limitada retención en la madera (Chittenden & Singh, 2011).

Otro aspecto limitante es su baja capacidad de penetración en la matriz lignocelulósica, lo que dificulta una distribución homogénea del compuesto y reduce

su efectividad frente a organismos que degradan las capas internas del material. Esta limitada penetración afecta la uniformidad del tratamiento y su eficacia contra hongos responsables de la degradación estructural de la madera (Papola et al., 2025). Finalmente, a estas limitaciones técnicas se suman barreras regulatorias y económicas, ya que la validación de biopreservantes bajo normativas internacionales requiere procesos extensos y costosos que pueden retrasar su implementación en el mercado (Vettraino et al., 2023).

Futuro de los preservantes ecológicos y estrategias de mejora

El futuro de la protección de la madera se orienta hacia el desarrollo de sistemas más estables, robustos y eficientes, basados en la integración de compuestos naturales con tecnologías avanzadas de formulación. En este contexto, los aceites esenciales dejan de concebirse únicamente como extractos botánicos con actividad antifúngica para posicionarse como parte de una nueva generación de biopreservantes capaces de cumplir con los requisitos técnicos de la industria de la madera, bajo criterios de sostenibilidad y economía circular. Diversas estrategias han sido propuestas para mejorar su desempeño y superar las limitaciones asociadas a su aplicación directa. Estudios sobre recubrimientos y sistemas de protección basados en compuestos orgánicos indican que las mejoras deben centrarse en la incorporación de matrices protectoras que integren aceites esenciales, compuestos naturales, biopolímeros y aditivos renovables, con el fin de reducir la dependencia de preservantes sintéticos persistentes y mejorar la estabilidad de los compuestos activos (Calovi et al., 2024).

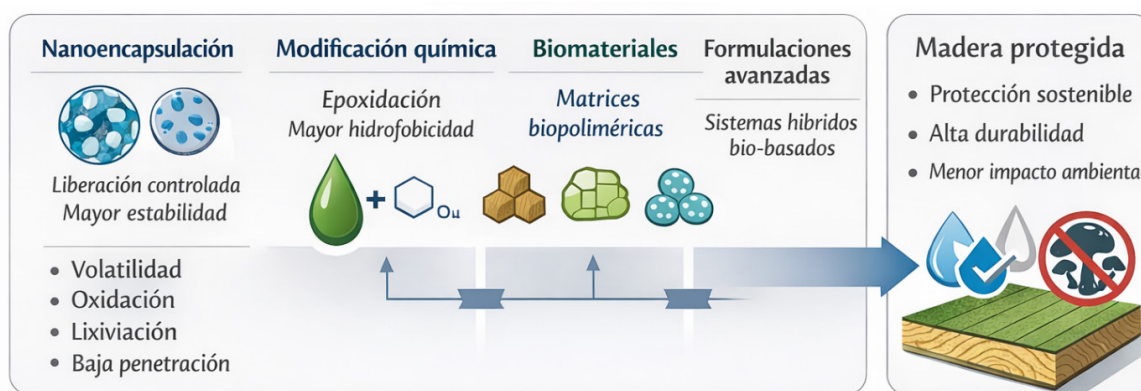


Figura 3. Estrategias de mejora para el desarrollo de bio-preservantes basados en aceites esenciales aplicados a la madera. Elaboración propia con apoyo de ChatGPT versión GPT-5 (OpenAI 2026).

En la Figura 3 se representan algunas de las estrategias de mejora para el desarrollo de biopreservantes a base de aceites esenciales. La modificación química es una estrategia orientada a mejorar tanto la estabilidad con la interacción con el agua, favoreciendo superficies más hidrofóbicas con mayores efectos antifúngicos y

mejorar la penetración de agua en la madera (hacer las superficies más hidrofóbicas). Por ejemplo, es el aceite de linaza, este aceite no solo es renovable, sino que también actúa como barrera protectora contra el agua y como base para bioacabados y tratamientos de impregnación. La eficacia de estos sistemas depende del tipo de formulación, la tasa de secado oxidativo y el potencial de modificación química del aceite (Cirule et al. 2024).

Otra dirección importante involucra la implementación de la nanotecnología para la protección de la madera. Debido a la alta volatilidad, susceptibilidad a la oxidación y pérdida por lixiviación de los aceites esenciales, las formulaciones nanoestructuradas se plantean como vehículos de liberación controlada. La encapsulación de un activo en nanopartículas puede proteger los compuestos activos contra la degradación y evaporación prematuras, aumentar su adhesión en el sustrato lignocelulósicos y promover una liberación prolongada (Baldassarre et al. 2023). Las nanopartículas de lignina cargadas con aceites esenciales de *Thymus*, por ejemplo, han mostrado una mayor eficacia en la inhibición de hongos de pudrición café, mientras que los recubrimientos con nanopartículas de lignina o poliácido láctico-co-glicólico (PLGA) presentan una mejor retención del aceite en la madera en comparación con aceites no encapsulados.(Zikeli et al. 2024; Zikeli et al. 2023). Asimismo, la encapsulación de aceites esenciales con nanoquitosano, ha demostrado una mejora en la resistencia a la lixiviación y en la penetración en la microestructura de la madera, contribuyendo a una mayor estabilidad del aceite (Ahmed et al. 2026).

Modificar aceites esenciales para mejorar su reactividad y estabilidad es otra estrategia relevante. La epoxidación para aceites esenciales y otros procesos químicos permite obtener materiales con mayor capacidad de formación de película, mayor y mejor adhesión a la superficie de la madera en comparación con aceites no modificados (Cirule et al. 2024). También, se pueden formar complejos de inclusión, nano emulsiones y microcápsulas que reducen la volatilidad y permiten preservar la actividad biológica de los aceites esenciales (Baldassarre et al. 2023; Zikeli et al. 2024). Aunque no todas estas estrategias se han consolidado plenamente en aplicaciones industriales, existe un creciente interés en pasar de la aplicación directa de aceites a formulaciones funcionales más estables y eficientes. (Cirule et al. 2024).

Por último, la incorporación de biomateriales sostenibles es un punto de particular interés. En lugar de depender de aceites esenciales como productos aislados, los últimos trabajos investigan la interacción con matrices poliméricas como lignina,

celulosa nanocrystalina, quitosano, así como otros biopolímeros (Ahmed et al. 2026; Calovi et al. 2024). Esta integración permite no solo mejorar la estabilidad fisicoquímica de los compuestos activos, sino también generar sistemas con propiedades de barrera, formación de película y liberación controlada, además de favorecer el aprovechamiento de residuos dentro de un enfoque de bioeconomía circular (Calovi et al. 2024). Las emulsiones formadas con nanocrisales de celulosa, por ejemplo, han aumentado en gran medida la estabilidad y bioactividad del aceite esencial de tomillo (Baldassarre et al. 2023), y la aplicación de quitosano y lignina como vehículos corresponde a métodos de bioeconomía circular, y la importancia de los desechos marinos, forestales o agroindustriales como desechos (Ahmed et al. 2026).

En este sentido, la próxima generación de tratamientos de protección ecológicos para madera no se limitará a la actividad antifúngica, sino que integrará diseño funcional, compatibilidad ambiental y desempeño tecnológico en sistemas híbridos más avanzados (Calovi et al., 2024; Woźniak, 2022). Además, la búsqueda de sistemas con menor toxicidad para la protección de la madera frente a diversos agentes degradadores resulta fundamental para mantener su viabilidad como material de construcción renovable en condiciones de riesgo (Calovi et al. 2024; Morrell 2017; Woźniak 2022).

Conclusión

El uso de aceites esenciales como alternativa a los tratamientos de protección sintéticos representa una estrategia prometedora para la protección de la madera, especialmente en el contexto de la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental. Los compuestos bioactivos derivados de plantas aromáticas, como fenoles y terpenos, han demostrado una notable actividad antifúngica frente a hongos de pudrición blanca y parda, lo que confirma su potencial como agentes biopreservantes. No obstante, su aplicación directa presenta limitaciones, principalmente asociadas a su volatilidad, susceptibilidad a la degradación y pérdida por lixiviación, lo que afecta su estabilidad y eficacia en condiciones reales. Estos desafíos evidencian que, más allá de su actividad biológica, el desempeño de estos compuestos depende en gran medida de su capacidad de permanencia e interacción con la matriz lignocelulósica.

En este sentido, el desarrollo de estrategias de formulación, como la encapsulación, la modificación química y la integración en matrices poliméricas, emerge como un enfoque clave para mejorar su estabilidad, controlar su liberación y aumentar su eficacia a largo plazo. Estas aproximaciones reflejan una transición desde el uso de extractos naturales hacia sistemas funcionales más complejos, diseñados para

responder a las exigencias técnicas de la industria de la madera. Por lo tanto, el futuro de los tratamientos de protección orgánicos como los aceites esenciales no radica únicamente en la identificación de compuestos bioactivos, sino en su integración en sistemas tecnológicos que permitan traducir su potencial en soluciones viables bajo condiciones reales de uso. La investigación futura deberá enfocarse en optimizar formulaciones, evaluar su desempeño a escala industrial y consolidar su implementación dentro de modelos de bioeconomía circular.

Referencias

- Ahmed, N., Boyd-Shields, G. D., Stokes, C. E., y Hassan, E. B. (2026). Nano-Chitosan Formulations and Essential Oil Encapsulation for Sustainable Wood Protection: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 16(5), 2207. <https://doi.org/10.3390/app16052207>
- Baldassarre, F., Schiavi, D., Di Lorenzo, V., Biondo, F., Vergaro, V., Colangelo, G., Balestra, G. M., y Ciccarella, G. (2023). Cellulose Nanocrystal-Based Emulsion of Thyme Essential Oil: Preparation and Characterisation as Sustainable Crop Protection Tool. *Molecules*, 28(23), 7884. <https://doi.org/10.3390/molecules28237884>
- Broda, M. (2020). Natural Compounds for Wood Protection against Fungi—A Review. *Molecules*, 25(15), 3538. <https://doi.org/10.3390/molecules25153538>
- Calovi, M., Zanardi, A., y Rossi, S. (2024). Recent Advances in Bio-Based Wood Protective Systems: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/app14020736>
- Cirule, D., Anderson, I., Kuka, E., y Andersons, B. (2024). Recent Research on Linseed Oil Use in Wood Protection—A Review. *Sci*, 6(3), 54. <https://doi.org/10.3390/sci6030054>
- Hasan, A. R., Hu, L., Solo-Gabriele, H. M., Fieber, L., Cai, Y., y Townsend, T. G. (2010). Field-scale leaching of arsenic, chromium and copper from weathered treated wood. *Environmental Pollution*, 158(5), 1479-1486. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.027>
- Morais, S., Fonseca, H. M. A. C., Oliveira, S. M. R., Oliveira, H., Gupta, V. K., Sharma, B., y de Lourdes Pereira, M. (2021). Environmental and Health Hazards of Chromated Copper Arsenate-Treated Wood: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11), 5518. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115518>
- Morrell, J. J. (2017, 2017//). *Protection of Wood: A Global Perspective on the Future*. Paper presented at the Wood is Good, Singapore.
- OpenAI. (2026). ChatGPT (versión GPT-5) [Modelo de lenguaje grande]. <https://>

chat.openai.com/

- Simunkova, K., Hysek, S., Reinprecht, L., Sobotnik, J., Liskova, T., y Panek, M. (2022). Lavender Oil as Eco-Friendly Alternative to Protect Wood Against Termites Without Negative Effect on Wood Properties. *Sci Rep*, 12(1), 1909. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05959-5>
- Woźniak, M. (2022). Antifungal Agents in Wood Protection—A Review. *Molecules*, 27(19), 6392. <https://doi.org/10.3390/molecules27196392>
- Xie, Y., Wang, Z., Huang, Q., y Zhang, D. (2017). Antifungal Activity of Several Essential Oils and Major Components Against Wood-rot Fungi. *Industrial Crops and Products*, 108, 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.041>
- Zikeli, F., Jusic, J., Palocci, C., Mugnozza, G. S., y Romagnoli, M. (2024). Spray Coating of Wood with Nanoparticles from Lignin and Polylactic Glycolic Acid Loaded with Thyme Essential Oils. *Polymers*, 16(7), 947. doi:<https://doi.org/10.3390/polym16070947>
- Zikeli, F., Vettraino, A. M., Biscontri, M., Bergamasco, S., Palocci, C., Humar, M., y Romagnoli, M. (2023). Lignin Nanoparticles with Entrapped Thymus spp. Essential Oils for the Control of Wood-Rot Fungi. *Polymers*, 15(12), 2713. <https://doi.org/10.3390/polym15122713>