

Aplicaciones biotecnológicas de la degradación bioquímica de madera por acción de hongos Xilófagos: pudrición parda y blanca

 **Mena-Morales, Catalina**

 **Morales-Rodríguez, Camila**

 **Vargas-Venegas, Itnan**

 **Villalobos-Quintanilla, Brayan**

 **Viquez-Muñoz, Víctor**

Aplicaciones biotecnológicas de la degradación bioquímica de madera por acción de hongos Xilófagos: pudrición parda y blanca

Tecnología en marcha, vol. 36, núm. 1, pp. 97-105, 2023

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=699877376013>

Aplicaciones biotecnológicas de la degradación bioquímica de madera por acción de hongos Xilófagos: pudrición parda y blanca

Catalina Mena-Morales

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

cmenam2001@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-0869-4479>

Camila Morales-Rodríguez

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

camimorales150@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-1389-7323>

Itzan Vargas-Venegas

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

ItzanVargasVenegas@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-6379-7430>

Brayan Villalobos-Quintanilla

Instituto Tecnológico de Costa Rica., Costa Rica

brayan.v.q10@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7273-4175>

Víctor Víquez-Muñoz

Instituto Tecnológico de Costa Rica., Costa Rica

victorvm1106@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5710-6189>

Recepción: 18 Noviembre 2021

Aprobación: 03 Abril 2022



Acceso abierto diamante

Resumen

Entre los factores bióticos con habilidad para degradar la madera se encuentran los hongos xilófagos. Estos organismos se clasifican según las preferencias de sustrato de crecimiento y sus patrones de descomposición de la madera; sobresaliendo aquellos causantes de las podredumbres blanca y parda o marrón. La principal diferencia entre ellos reside en su mecanismo de degradación, pues la podredumbre blanca se basa en la hidrólisis enzimática; mientras que la podredumbre marrón realiza una modificación de la lignina mediante la química de Fenton y especies reactivas de oxígeno, para llevar a cabo una posterior hidrólisis enzimática. Tanto la pudrición blanca como la parda poseen valiosas aplicaciones biotecnológicas en cuanto a biorremediación. Entre ellas sobresalen el manejo de desechos, degradación de químicos persistentes en el ambiente, remoción de metales tóxicos, entre otros.

Palabras clave: Reacciones Fenton, enzimas lignocelulósicas, biorremediación, agroquímicos, pigmentos, inmovilización, metales pesados.

Abstract

There are different biotic factors that capable of degrading wood, among them xylophagous fungi. Amid the main types of these fungi are those that cause white rot and brown rot. These fungi can be classified according to growth substrate preferences and, wood decomposition patterns. While white rot fungi degrade wood through enzymatic hydrolysis, brown rot fungi follow a two-step degrading process involving lignin-modifying reactive oxygen species derived from Fenton reaction, followed by specialized enzymes that hydrolyze cellulose and hemicellulose. Both types of rot fungi have remarkable biotechnological

applications regarding bioremediation. Among the principal applications are waste management, chemical degradation of environmentally persistent compounds, metal detox and others.

Keywords: Fenton reaction, lignocellulosic enzymes, bioremediation, agrochemicals, pigments, immobilization, heavy metals.

Introducción

La madera es uno de los materiales celulósicos más resistentes, aunque existen organismos capaces de degradarla, denominados xilófagos [1], [2]. Los hongos xilófagos se pueden clasificar según sus preferencias de sustrato de crecimiento y sus patrones de descomposición, sobresaliendo los hongos de podredumbre blanca (HPB) y marrón o parda (HPP) [3]. La degradación de madera es de gran importancia a nivel ecológico, pues participa en los ciclos biogeoquímicos del carbono y del nitrógeno. Además, a nivel industrial presenta gran cantidad de aplicaciones [4], [5].

En términos generales, la mayoría de los HPP y HPB son Basidiomycota Agaricomycete, dada la divergencia teorizada de un ancestro común [6]. No obstante, los HPP se diferencian en que sufrieron una delección de los genes degradadores de lignina [7] y, a modo de adaptación, emplean peroxidasas generales no ligninolíticas de bajo potencial redox [8]. Por otro lado, los HPB degradan la lignina mediante un sistema enzimático extracelular ligninolítico [9].

Los HPP son capaces de degradar celulosa y hemicelulosa, pero solamente modificar la lignina [10]. Estos utilizan mecanismos tanto oxidativos como hidrolíticos [11], caracterizados por una expresión genética diferenciada [12]. La fase oxidativa demanda la expresión de peroxidasas para la reacción de Fenton, modificando la lignina al exponerla a especies reactivas de oxígeno (ROS), abriendo la pared celular y el xilema [13]. Luego, la hidrólisis de polisacáridos requiere la expresión de enzimas activas en carbohidratos (CAZymes), que hidrolizan completamente la celulosa y la hemicelulosa [8], [14], [15].

Cabe resaltar que la generación de ROS derivadas de Fenton ocurre solo dentro de la pared celular, que es inaccesible a las enzimas [13]. Por tanto, para equilibrar los potenciales productivos y deletéreos de las ROS, los hongos de la pudrición parda optimizan su concentración para segregar la producción de celulasas, evitando la oxidación enzimática [11, 15]. Entre las especies de HPP más estudiadas se encuentran *Postia placenta* [12], *Fomitopsis pinicola* [16], *Serpula lacrymans* y *Coniophora puteana* [8].

Por otro lado, los HPB son capaces de degradar completamente la lignina aeróbicamente [17]; mediante sistemas enzimáticos oxidativos intracelulares, como el citocromo P450, y extracelulares, como las lacasas y peroxidasas [18]. Los métodos de descomposición pueden ser simultáneos; cuando todos los polisacáridos componentes de la pared celular se degradan al mismo tiempo, selectivos; cuando la lignina y las hemicelulosas se degradan preferentemente; o duales, mezclando ambas estrategias descritas [19]. Por ejemplo, *Grifola frondosa* causa una deslignificación selectiva, mientras *Trametes versicolor* provoca degradación simultánea; aunque otros como *Pleurotus ostreatus* utilizan modos duales de degradación [20].

Los HPB son valiosos a nivel industrial por su plasticidad. Especies selectivas son de mayor interés en el ámbito bioindustrial, ya que eliminan la lignina, pero dejan intacta la celulosa [19]. También se han reportado HPB que causan ambos tipos de degradación dentro de un solo sustrato [21]. Además, estos hongos son comunes en los bosques de especies frondosas, ya que tienen un tipo de madera más susceptible [22]. Algunas especies incluso pueden variar su expresión génica según la composición de la pared celular que se busca degradar [20].

Por tanto, los HPP varían en crecimiento, estructura, sustancias secretadas y rutas metabólicas, generando diversas aplicaciones [23]. Del mismo modo, los sistemas ligninolíticos de los HPB generan gran interés por su plasticidad [19]. Por ello, mediante esta revisión, se pretende divulgar las principales aplicaciones biotecnológicas reportadas detrás de los mecanismos utilizados por los hongos xilófagos causantes de las pudriciones marrón y blanca.

Aplicaciones biotecnológicas de los hongos xilófagos

Hongos de podredumbre blanca

Alrededor del mundo, las industrias liberan en los efluentes entre 10% y 15% de los pigmentos empleados en procesos de tinción, por lo que el manejo inadecuado de estos colorantes conduce a la contaminación de aguas [24]. El robusto sistema enzimático de los HPB hace que sean capaces de metabolizar varios tipos de hidrocarburos aromáticos policíclicos, fenoles, dioxinas, entre otros [25], por lo cual han sido estudiados para la degradación de colorantes.

Los colorantes industriales son difíciles de degradar por su estructura aromática, por lo que se han investigado métodos físicos, químicos, electroquímicos y biológicos capaces de eliminarlos [26], [27]. Tratamientos abióticos como el carbón activado, precipitación, ozonización, y ósmosis reversa han presentado resultados efectivos. No obstante, estas estrategias presentan limitaciones por el uso intensivo de químicos, generación de desechos y elevado costo [28]. Los tratamientos biológicos se han popularizado, pues representan menores efectos nocivos sobre el ambiente y una relación costo-efectividad más beneficiosa [29], [30].

Asimismo, se han reportado hongos aerobios degradadores de contaminantes orgánicos como pigmentos azoicos [31]. Estos sistemas de biorremediación por HPB se han visto afectados por problemas de adsorción, por lo que se ha propuesto la producción y el uso individual de sus enzimas [28]. El potencial de degradación de colorantes podría deberse a la similitud estructural entre las moléculas de lignina y pigmentos, particularmente por su anillo fenólico [32], [27].

Los pigmentos se distinguen entre sí por la región cromófora de su molécula, por lo que varía la efectividad de distintos HPB su degradación [32]. Por ejemplo, el cromóforo Reactive Violet 1 es degradado con mayor efectividad por *Ganoderma cupreum* AG1 [33]. Otras especies con capaces de actuar sobre colorantes similares, como *Pseudolagarobasidium acaciicola* AGST3 que degrada los cromóforos Violet P3P, Green ME4BL, Blue 3R, Direct black 22, Green HE4G y Reactive red M5B [34]. Algunas otras especies con habilidad oxidativa sobre pigmentos son *Trametes hirsuta*, *Aspergillus niger*, *P. chrysosporium*, y *T. versicolor* [28].

Además, los hongos xilófagos tienen un alto potencial para degradar moléculas residuales de pesticidas [35]. Muchos de los pesticidas son persistentes, bioacumulativos y tóxicos para los seres vivos, asociándoseles con graves problemas de salud como el cáncer, trastornos neurológicos, respiratorios, y afecciones del sistema reproductivo [36]. Asimismo, los pesticidas degradan la tierra, contaminan el aire y agotan el recurso hídrico [37]. En ese sentido, la biorremediación es una alternativa eficaz que se ha aplicado extensamente para eliminar contaminantes ambientales mediante el uso de organismos como los HPB [38].

La especie *Trametes versicolor* se reconoce por su considerable poder de degradación de herbicidas. [39] Beltrán-Flores y colaboradores (2021), demostraron que al inmovilizarlo en madera de *Quercus ilex* degradó pesticidas como el diurón y el bentazón con un rendimiento del 93% y 90% respectivamente. Otro estudio, reportó la remoción del 94% del diurón en aguas agrícolas de desecho mediada por *T. versicolor* inmovilizado en astillas de pino [40]. Adicionalmente, se han reportado otras especies de HPB en el tratamiento de variados pesticidas como el neonicotinoide, carbofurano, fipronil, entre muchos otros [41] [42][43]. La inmovilización de la biomasa fúngica en soportes naturales es una estrategia utilizada para propiciar una rápida colonización del hongo, evitando cambios en el pH, temperatura o pérdida de biomasa [44].

En cuanto a la producción de biogas, la biomasa lignocelulósica como materia prima es biorrenovable, abundante y de barata [45]. La dificultad para degradarla ha llevado a que se implementen procesos mecánicos, térmicos, químicos, biológicos y sus combinaciones, para acelerar su hidrólisis y perfeccionar la producción de metano [46]. Los HPB sobresalen por su efectividad en el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica con este fin [47].

[48] Huang, Yuan, y Li (2020) investigaron el pretratamiento de pajas de arroz con *Pleurotus ostreatus* para producir biometano. El mayor rendimiento fue de 269 mL·g⁻¹ SV transcurridos 25 días de tratamiento, representando una mejora del 26.9% en comparación con pajas no tratadas. En este caso, la acción enzimática del hongo cambió las propiedades fisicoquímicas del material, aumentando a su vez la adsorción de celulasa y xilanas. Además, [49] Alexandropoulou et al. (2017) estudiaron la acción de

Leiotrametes menziesii y *Abortiporus biennis* en el pretratamiento de aserrín de sauce, obteniendo que la remoción de lignina por *L. menziesii* fue del 30.5% luego de 30 días, mientras que la de *A. biennis* fue de 17.1%

Hongos de podredumbre parda o marrón

Los HPP producen altos niveles de ácido oxálico y otros ácidos policarboxílicos quelantes y agentes reductores, por lo que pueden utilizarse para la eliminación de metales tóxicos a través de bioquelación o biolixiviación [50]. Existen preservantes de madera a base de cobre (Cu) altamente tóxicos, utilizados como biocidas contra hongos xilófagos. Sin embargo, existen HPP tolerantes al Cu [51], que producen altas cantidades de ácido oxálico e inducen la precipitación de los iones de Cu con oxalato, mediante la quelación [52]. Los complejos formados se depositan en la superficie de la madera de forma inerte, permitiendo la detoxificación [53], [54].

En un estudio, se evaluó la eficacia de la remediación fúngica del cobre cromado en postes de Eucalipto (*Corymbia citriodora*) tratados con Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), un preservante de madera [55]. De los metales componentes del CCA, el cobre fue el mejor removido por los hongos utilizados: *Fibroporia radiculosa* extrajo un 96% y *Coniophora puteana*, *Antrodia vaillantii* y *Postia placenta* extrajeron un 90% del contenido de Cu [56]. Asimismo, [57] Hattory et al. (2015) cultivaron bloques de cedro japonés (*Cryptomeria japonica*) tratados con sulfato de cobre (CuSO₄) con dos especies de HPP. Al cabo de seis semanas de tratamiento, *Fomitopsis palustris* TYP-0507 removió el 45.9% del cobre y *Antrodia xantha* Shiga-1F extrajo un 40.7%.

Asimismo, dado que los HPP utilizan la reacción de Fenton, son capaces de generar radicales hidroxilos (OH⁻) capaces de degradar compuestos xenobióticos, antibióticos, tintes, pesticidas y otros [58]. Se ha demostrado la capacidad de degradación del pesticida dicloro difenil tricloroetano (DDT) por el hongo *Fomitopsis pinicola* en un co-cultivo con la bacteria *Bacillus subtilis*, cuya máxima degradación fue de alrededor del 86% [59]. Otro estudio, demostró que el HPP *Daedalea dickinsii* fue capaz de decolorizar el azul de metileno en un 54% [60]. Igualmente, [61] Purnomo et al. (2020) demostraron que al adicionar *Pseudomonas aeruginosa* a un cultivo de *Gloeophyllum trabeum*, es posible degradar el pigmento azoderivado llamado naranja de metilo, en un 88.67%.

Conclusiones y Perspectivas Futuras

Dadas las diferencias entre la podredumbre blanca y marrón, hay una amplia variedad de aplicaciones para los procesos biológicos que ocurren en estos organismos. Tal es el caso de la producción de ácidos policarboxílicos en hongos de la podredumbre marrón, que exhiben propiedades bioquelatantes útiles para el tratamiento de la contaminación con metales tóxicos. Asimismo, se han investigado formas de aprovechar las enzimas generadas por los hongos de podredumbre blanca, entre las cuales destacan la degradación de colorantes y restos de pesticidas, así como el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica para producción de biogas.

La inmovilización de hongos xilófagos para degradar pesticidas podría ser útil para llevar a cabo la biorremediación a gran escala. Un reto actual para el uso de hongos xilófagos para estos fines es su baja resistencia a condiciones medioambientales no parametrizadas [62]. Por tanto, perfeccionar las técnicas de inmovilización existentes y estudiar nuevos soportes naturales es crucial para futuras proyecciones a gran escala. Asimismo, la profundización en la investigación sobre las aplicaciones en los HPP es necesaria, ya que por su capacidad de bioquelación podría aprovecharse en aplicaciones agrícolas como organismos solubilizadores de fosfato [63].

Por otro lado, la utilización de HPB como un medio efectivo de pretratamiento de biomasa lignocelulósica para la producción de biogas representa una importante aplicación para los desechos orgánicos en la agricultura. Actualmente una gran cantidad de desechos lignocelulósicos no se aprovechan y se descartan mediante técnicas de alto impacto ambiental, como la quema [64]. En otros casos, estos residuos agrícolas no reciben un tratamiento de descarte, volviéndose un factor de riesgo al atraer de plagas

dañinas para los cultivos [65]. Por tanto, la aplicación de HPB podría ayudar favorecer el aprovechamiento de los residuos agrícolas, convirtiéndolos en una fuente de energía alternativa amigable con el ambiente.

Referencias

- [1] B. Goodell, J. E. Winandy, y J. J. Morrell, "Fungal Degradation of Wood: Emerging Data, New Insights and Changing Perceptions," *Coatings*, vol. 10, no. 12, p. 1210, Dec. 2020, doi: 10.3390/coatings10121210.
- [2] G. Oliveira, F. de Oliveira, S. B.-P. S. Integrity, 2018, "Wood preservation for preventing biodeterioration of Cross Laminated Timber (CLT) panels assembled in tropical locations," Elsevier, Recuperado: 1 de Octubre 2021. [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618301331>
- [3] F. S. Krah, C. Bässler, C. Heibl, J. Soghigian, H. Schaefer, y D. S. Hibbett, "Evolutionary dynamics of host specialization in wood-decay fungi," *BMC Evolutionary Biology*, vol. 18, no. 1, Agosto 2018, doi: 10.1186/S12862-018-1229-7.
- [4] M. Köhl, H. P. Ehrhart, M. Knauf, y P. R. Neupane, "A viable indicator approach for assessing sustainable forest management in terms of carbon emissions and removals," *Ecological Indicators*, vol. 111, p. 106057, Abril 2020, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2019.106057.
- [5] T. S.- Forests, 2017, "Arthropod diversity and functional importance in old-growth forests of North America," *mdpi.com*, doi: 10.3390/f8040097.
- [6] T. Mali, J. Kuuskeri, F. Shah, y T. K. Lundell, "Interactions affect hyphal growth and enzyme profiles in combinations of coniferous wood-decaying fungi of Agaricomycetes," *PLOS ONE*, vol. 12, no. 9, p. e0185171, Septiembre 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0185171.
- [7] G. N. Presley, E. Panisko, S. O. Purvine, y J. S. Schilling, "Coupling Secretomics with Enzyme Activities To Compare the Temporal Processes of Wood Metabolism among White and Brown Rot Fungi," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 84, no. 16, pp. 159–177, Agosto 2018, doi: 10.1128/AEM.00159-18.
- [8] T. K. Lundell, M. R. Mäkelä, R. P. de Vries, y K. S. Hildén, "Genomics, Lifestyles and Future Prospects of Wood-Decay and Litter-Decomposing Basidiomycota," *Advances in Botanical Research*, vol. 70, pp. 329–370, Enero 2014, doi: 10.1016/B978-0-12-397940-7.00011-2.
- [9] E. Rouches, I. Herpoël-Gimbert, J. P. Steyer, y H. Carrere, "Improvement of anaerobic degradation by white-rot fungi pretreatment of lignocellulosic biomass: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.317.
- [10] W. Montejó-Mayo, E. D.-R.- Phytion, 2021, "Inhibitory Effect of N, N-Dimethylhexadecylamine on the Growth of White-Rot Fungus *Trametes versicolor* (L.) en Wood," *search.proquest.com*, Recuperado: 10 de Octubre 2021. [en línea]. Disponible en: <https://search.proquest.com/openview/b03b050aca11b5c8dd14ea8d69189efc/1?pq-origsite=gscholarycbl=4585451>
- [11] G. N. Presley, E. Panisko, S. O. Purvine, y J. S. Schilling, "Coupling Secretomics with Enzyme Activities To Compare the Temporal Processes of Wood Metabolism among White and Brown Rot Fungi," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 84, no. 16, pp. 159–177, Agosto 2018, doi: 10.1128/AEM.00159-18.
- [12] J. Zhang, G.N. Presley, K.E. Hammel, J-S. Ryu, J.R. Menke, M. Figueroa, D. Hu, G. Orr, y J.S. Schilling, "Localizing gene regulation reveals a staggered wood decay mechanism for the brown rot fungus *Postia placenta*," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 39, pp. 10968–10973, Septiembre 2016, doi: 10.1073/PNAS.1608454113.
- [13] Y. Zhu, N. Plaza, Y. Kojima, M. Yoshida, J. Zhang, J. Jellison, S. Venkatesh Pingali, H. O'Neill y B. Goodell, "Nanostructural Analysis of Enzymatic and Non-enzymatic Brown Rot Fungal Deconstruction of the Lignocellulose Cell Wall," *Frontiers in Microbiology*, vol. 0, p. 1389, Junio 2020, doi: 10.3389/FMICB.2020.01389.

- [14] K. Hildén y M. R. Mäkelä, "Role of Fungi in Wood Decay," in Reference Module in Life Sciences, Elsevier, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.12424-0>.
- [15] G. N. Presley, J. Zhang, y J. S. Schilling, "A genomics-informed study of oxalate and cellulase regulation by brown rot wood-degrading fungi," *Fungal Genetics and Biology*, vol. 112, pp. 64–70, Marzo 2018, doi: [10.1016/J.FGB.2016.08.004](https://doi.org/10.1016/J.FGB.2016.08.004).
- [16] B. Wu, J. Gaskell, B.W. Held, C. Toapanta, T. Vuong, S. Ahrendt, A. Lipzen, J. Zhang, J.S. Schilling, E. Master, I.V. Grigoriev, R.A. Blanchette, D. Cullen y D.S. Hibbett, "Substrate-Specific Differential Gene Expression y RNA Editing in the Brown Rot Fungus *Fomitopsis pinicola*," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 84, no. 16, Agosto 2018, doi: [10.1128/AEM.00991-18](https://doi.org/10.1128/AEM.00991-18).
- [17] N. Nayan, A. S. M. Sonnenberg, W. H. Hendriks, y J. W. Cone, "Screening of white-rot fungi for bioprocessing of wheat straw into ruminant feed," *J. Appl. Microbiol.*, 2018, doi: [10.1111/jam.13894](https://doi.org/10.1111/jam.13894).
- [18] I. A. Vasiliadou, R. Molina, M. I. Pariente, K. C. Christoforidis, F. Martinez, y J. A. Melero, "Understanding the role of mediators in the efficiency of advanced oxidation processes using white-rot fungi," *Chem. Eng. J.*, 2019, doi: [10.1016/j.cej.2018.11.035](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.035).
- [19] L. Reinprecht, *Wood Deterioration, Protection and Maintenance*. Oxford, UK: John Wiley y Sons, Ltd, 2016. doi: [10.1002/9781119106500](https://doi.org/10.1002/9781119106500).
- [20] Bari, E., Daniel, G., Yilgor, N., Kim, J. S., Tajick-Ghanbary, M. A., Singh, A. P., & Ribera, J. (2020). Comparison of the Decay Behavior of Two White-Rot Fungi in Relation to Wood Type and Exposure Conditions. *Microorganisms*, 8(12), 1931. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8121931>
- [21] S. Rodríguez-Couto, "Industrial and environmental applications of white-rot fungi," *Mycosphere*, vol. 8, no. 3, pp. 456–466, Mar. 2017, doi: [10.5943/mycosphere/8/3/7](https://doi.org/10.5943/mycosphere/8/3/7).
- [22] J. Piętko, A. Gendek, J. Malaták, J. Velebil, y T. Moskalik, "Effects of selected white-rot fungi on the calorific value of beech wood (*Fagus sylvatica* L.)," *Biomass and Bioenergy*, vol. 127, p. 105290, Aug. 2019, doi: [10.1016/j.biombioe.2019.105290](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105290).
- [23] G. Presley, J. S.-A., 2017, "Distinct growth and secretome strategies for two taxonomically divergent brown rot fungi," *Am Soc Microbiol*, vol. 83, no. 7, pp. 2987–3003, Abril 2017, doi: [10.1128/AEM.02987-16](https://doi.org/10.1128/AEM.02987-16).
- [24] L. Hossain, S. K. Sarker, y M. S. Khan, "Evaluation of present and future wastewater impacts of textile dyeing industries in Bangladesh," *Environ. Dev.*, vol. 26, pp. 23–33, Jun. 2018, doi: [10.1016/J.ENVDEV.2018.03.005](https://doi.org/10.1016/J.ENVDEV.2018.03.005).
- [25] R. K. Pandey, S. Tewari, y L. Tewari, "Lignolytic mushroom *Lenzites elegans* WDP2: Laccase production, characterization, and bioremediation of synthetic dyes," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 158, pp. 50–58, Aug. 2018, doi: [10.1016/J.ECOENV.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.04.003).
- [26] R. G. Saratale, G. D. Saratale, J. S. Chang, y S. P. Govindwar, "Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 138–157, Jan. 2011, doi: [10.1016/J.JTICE.2010.06.006](https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2010.06.006).
- [27] Mcyotto, Q. Wei, D. K. Macharia, M. Huang, C. Shen, y C. W. K. Chow, "Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation," *Chem. Eng. J.*, vol. 405, p. 126674, Feb. 2021, doi: [10.1016/J.CEJ.2020.126674](https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126674).
- [28] S. G. Rudakiya, Darshan, Archana, Tripathi y A. Gupte, "Fungal Bioremediation: A Step Towards Cleaner Environment". *Advancing Frontiers in Mycology y Mycotechnology*, 229–249 | [10.1007/978-981-13-9349-5_9](https://doi.org/10.1007/978-981-13-9349-5_9). https://doi.org/10.1007/978-981-13-9349-5_9
- [29] W. Przysaś, E. Zabłocka-Godlewska, y E. Grabińska-Sota, "Efficiency of decolorization of different dyes using fungal biomass immobilized on different solid supports," *Brazilian J. Microbiol.*, vol. 49, no. 2, pp. 285–295, Apr. 2018, doi: [10.1016/J.BJM.2017.06.010](https://doi.org/10.1016/J.BJM.2017.06.010).

- [30] R. Ilamathi, A. Merline Sheela, y N. Nagendra Gandhi, "Comparative evaluation of *Pseudomonas* species in single chamber microbial fuel cell with manganese coated cathode for reactive azo dye removal," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 144, p. 104744, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.IBIOD.2019.104744.
- [31] C. Nie, J. Dong, P. Sun, C. Yan, H. Wu, y B. Wang, "An efficient strategy for full mineralization of an azo dye in wastewater: a synergistic combination of solar thermo- and electrochemistry plus photocatalysis," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 58, pp. 36246–36255, Jul. 2017, doi: 10.1039/C7RA05797K.
- [32] H. Zhang, H. Yang, K. Xie, A. Hou, y A. Gao, "Novel reactive dyes with intramolecular color matching combination containing different chromophores," *Dye. Pigment.*, vol. 159, pp. 576–583, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.DYEPIG.2018.07.031.
- [33] M. Gahlout, • Darshan, M. Rudakiya, S. Gupte, • Akshaya Gupte, y A. Gupte, "Laccase-conjugated amino-functionalized nanosilica for efficient degradation of Reactive Violet 1 dye," *Int. Nano Lett.*, vol. 7, pp. 195–208, 2017, doi: 10.1007/s40089-017-0215-1.
- [34] S. Thakur y A. Gupte, "Optimization and hyper production of laccase from novel agaricomycete *Pseudolagarobasidium acaciicola* AGST3 and its application in in vitro decolorization of dyes," *Ann. Microbiol.*, vol. 65, no. 1, pp. 185–196, 2015, doi: 10.1007/s13213-014-0849-4.
- [35] H. Khatoon, J. P. N. Rai, y A. Jillani, "Role of fungi in bioremediation of contaminated soil," en *Fungi Bio-Prospects in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-technology*, Academic Press, 2021, pp. 121–156. doi: 10.1016/B978-0-12-821925-6.00007-1.
- [36] L. Rani, K. Thapa, N. Kanojia y N. Sharma, "An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 283, p. 124657, 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.124657.
- [37] Y. Mehmood, M. Arshad, N. Mahmood, H. Kächele, y R. Kong, "Occupational hazards, health costs, and pesticide handling practices among vegetable growers in Pakistan," *Environmental Research*, vol. 200, pp. 111–340, 2021, doi: 10.1016/J.ENVRES.2021.111340.
- [38] R. Zhuo y F. Fan, "A comprehensive insight into the application of white rot fungi and their lignocellulolytic enzymes in the removal of organic pollutants," *Science of The Total Environment*, vol. 778, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.146132.
- [39] E. Beltrán-Flores, M. Sarrà, y P. Blánquez, "Pesticide bioremediation by *Trametes versicolor*: Application in a fixed-bed reactor, sorption contribution and bioregeneration," *Science of The Total Environment*, vol. 794, p. 148386, 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148386.
- [40] E. Beltrán-Flores, J. Torán, G. Caminal, P. Blánquez, y M. Sarrà, "The removal of diuron from agricultural wastewaters by *Trametes versicolor* immobilized on pinewood in simple channel reactors," *Science of The Total Environment*, vol. 728, p. 138414, Ago. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.138414.
- [41] A. Chen, W. Li, X. Zhang, C. Shang, S. Luo, R. Cao, y D. Jin, "Biodegradation and detoxification of neonicotinoid insecticide thiamethoxam by white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 417, p. 126017, Set. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.126017.
- [42] Z. Li, X. Wang, Z. Ni, J. Bao, y H. Zhang, "In-situ Remediation of Carbofuran-Contaminated Soil by Immobilized White-Rot Fungi," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 29, no. 2, pp. 1237–1243, Ene. 2020, doi: 10.15244/PJOES/102671.
- [43] J. M. Wolfand, G. H. LeFevre, y R. G. Luthy, "Metabolization and degradation kinetics of the urban-use pesticide fipronil by white rot fungus *Trametes versicolor*," *Environmental Science: Processes y Impacts*, vol. 18, no. 10, pp. 1256–1265, Oct. 2016, doi: 10.1039/C6EM00344C.
- [44] P. D. Chaparro Bustos y D. Gómez Perdomo, "Evaluación de la inmovilización de *Trametes versicolor* DSM 3086 en estropajo común (*Luffa cylindrica*)," Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia, 2018.

- [45] L. Capolupo y V. Faraco, "Green methods of lignocellulose pretreatment for biorefinery development," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 100, no. 22, pp. 9451–9467, Oct. 2016, doi: 10.1007/S00253-016-7884-Y.
- [46] G. Zhen, X. Lu, H. Kato, Y. Zhao, y Y. Y. Li, "Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 559–577, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.187.
- [47] U. Schimpf y R. Schulz, "Industrial by-products from white-rot fungi production. Part II: Application in anaerobic digestion for enzymatic treatment of hay and straw," *Process Biochemistry*, vol. 76, pp. 142–154, Ene. 2019, doi: 10.1016/J.PROCBIO.2018.10.006.
- [48] W. B. Huang, H. R. Yuan, y X. J. Li, "Multi-perspective analyses of rice straw modification by *Pleurotus ostreatus* and effects on biomethane production," *Bioresource Technology*, vol. 296, p. 122365, Ene. 2020, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2019.122365.
- [49] M. Alexandropoulou, G. Antonopoulou, E. Fragkou, I. Ntaikou, y G. Lyberatos, "Fungal pretreatment of willow sawdust and its combination with alkaline treatment for enhancing biogas production," *Journal of Environmental Management*, vol. 203, pp. 704–713, Dic. 2017, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2016.04.006.
- [50] T. Singh y A. P. Singh, "White and Brown Rot Fungi as Decomposers of Lignocellulosic Materials and Their Role in Waste and Pollution Control," en *Fungal Applications in Sustainable Environmental Biotechnology*, 1ra ed., Springer, 2016, pp. 233–247. doi: 10.1007/978-3-319-42852-9_9.
- [51] A. Akgul, A. Akgul, J. D. Tang, y S. V Diehl, "Gene Expression Analysis Of Wood Decay Fungus *Fibroporia Radiculosa* Grown In Acq-Treated Wood," *Wood and Fiber Science*, vol. 50, no. 2, pp. 1–12, 2018.
- [52] K. M. Ohno, A. B. Bishell, y G. R. Stanosz, "Gene Expression Analysis of Three Putative Copper-Transporting ATPases in Copper-Tolerant *Fibroporia radiculosa*," *Frontiers in Microbiology*, Dec. 2020, doi: 10.3389/FMICB.2020.586940.
- [53] A. Akgul y A. Akgul, "Mycoremediation of Copper: Exploring the Metal Tolerance of Brown Rot Fungi," *BioResources*, vol. 13, no. 3, pp. 7155–7171, 2018.
- [54] C. Lenz, E. Melcher, R. Möller, y S. Lautner, "Research Papers Microscopic Investigations Concerning In Situ Oxalate Formation By The Brown-Rot Fungus *Poria Placenta*," *Drewno*, vol. 60, no. 199, 2017, doi: 10.12841/wood.1644-3985.215.01.
- [55] D. Xing, S. Magdouli, J. Zhang, y A. Koubaa, "Microbial remediation for the removal of inorganic contaminants from treated wood: Recent trends and challenges," *Chemosphere*, vol. 258, p. 127429, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.127429.
- [56] L. G. da Costa, V. F. Brocco, J. B. Paes, G. T. Kirker, y A. B. Bishell, "Biological and chemical remediation of CCA treated eucalypt poles after 30 years in service," *Chemosphere*, vol. 286, p. 131629, Ene. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131629.
- [57] T. Hattori, H. Hisamori, S. Suzuki, T. Umezawa, T. Yoshimura, y H. Sakai, "Rapid copper transfer and precipitation by wood-rotting fungi can effect copper removal from copper sulfate-treated wood blocks during solid-state fungal treatment," *International Biodeterioration y Biodegradation*, vol. 97, pp. 195–201, Ene. 2015, doi: 10.1016/J.IBIOD.2014.11.011.
- [58] A. S. Purnomo, V. T. Mauliddawati, M. Khoirudin, A. F. Yonda, R. Nawfa, y S. R. Putra, "Bio-decolorization and novel bio-transformation of methyl orange by brown-rot fungi," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, no. 11, pp. 7555–7564, Jul. 2019, doi: 10.1007/S13762-019-02484-3.

- [59] A. Sariwati, A. S. Purnomo, y I. Kamei, “Abilities of Co-cultures of Brown-Rot Fungus *Fomitopsis pinicola* and *Bacillus subtilis* on Biodegradation of DDT,” *Current Microbiology* 2017 74:9, vol. 74, no. 9, pp. 1068–1075, Jun. 2017, doi: 10.1007/S00284-017-1286-Y.
- [60] H. D. Rizqi y A. S. Purnomo, “The ability of brown-rot fungus *Daedalea dickinsii* to decolorize and transform methylene blue dye,” *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 33, no. 5, pp. 1–9, Abr. 2017, doi: 10.1007/S11274-017-2256-Z.
- [61] A. S. Purnomo, F. D. Rahmadini, R. Nawfa, y S. R. Putra, “The effect of addition of bacterium *Pseudomonas aeruginosa* on biodegradation of methyl orange dye by brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum*,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 980, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/980/1/012074.
- [62] K. S. Becerra Correa, “Análisis cualitativo de literatura sobre las técnicas de biorremediación de suelos por hidrocarburos y contaminantes orgánicos persistentes empleando el hongo *Trichoderma* sp.” Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia, 2020.
- [63] I. Rahim, Suherman, Hakza, A. Nasruddin, “The ability of rot fungi from cocoa plant in producing lignocellulosic enzymes.” In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 270, No. 1, p. 012037) IOP Publishing, 2019.
- [64] L. F. Ocampo Díaz, A.S.R. Pineda, P.A. Acevedo-Pabón e I. Cabeza Rojas, “Vigilancia tecnológica asociada a los pretratamientos para la generación de biogás a partir de sustratos lignocelulósicos.” Recuperado el 16 de noviembre del 2021. [en línea]. Disponible en: shorturl.at/euBUW
- [65] J.A. Solórzano, J. Gilles, O. Bravo, C. Vargas, Y. Gomez-Bonilla, G.V. Bingham y D.B. Taylor, “Biology and Trapping of Stable Flies (Diptera: Muscidae) Developing in Pineapple Residues (*Ananas comosus*) in Costa Rica,” *Journal of Insect Science*, vol. 15, no. 1, p. 145, 2015, doi: 10.1093/jisesa/iev127.