

¿Podría un biomaterial hecho con micelio de *Pleurotus ostreatus* funcionar como filtro de agua?

¿Could a biomaterial made with *Pleurotus ostreatus* work as a water filter?

Cristofer Coto-López¹, Melissa Mardones Hidalgo¹, Ronald Aguilar-Álvarez² and Carlos Rojas^{2,3}

¹ Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, 11501-Costa Rica.

² Escuela de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, 11501-Costa Rica.

³ Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, 11501-Costa Rica.

E-mail: cristofercoto.l@gmail.com

Received: 23 September 2023

Accepted for publication: 6 November 2023

Published: 8 December 2023

Editor: Nataly Gómez-Montoya

Resumen: La biosorción trata de absorber o remover contaminantes presentes en aire, suelo o agua mediante la utilización de biomasa viva o muerta. En este proyecto se construyeron bloques de heno conglomerados con hifas del hongo *Pleurotus ostreatus* con el fin de caracterizar el proceso constructivo y de proponer una alternativa biológica para la generación de filtros para aguas contaminadas. El material fue construido eficientemente y la densidad cualitativa del micelio llegó a ser muy alta en todas las réplicas estudiadas. A pesar de que el biomaterial fue primordialmente hidrofóbico, se logró documentar un alto porcentaje de absorción de agua – más del 200% del peso original – en comparación con otros materiales previamente comunicados en la literatura. De esta forma, tal material puede ser un candidato para el tratamiento de aguas para uso humano. Sin embargo, más estudios sobre el tema son necesarios todavía.

Abstract: Biosorption deals with absorbing or removing contaminants present in air, soil or water by means of using living or non-living biomass. In this project, a series of panels made of hay bound by *Pleurotus ostreatus* hyphae were constructed with the objective of characterizing the creation of the material and proposing an alternative to filtering contaminated water. The material was constructed efficiently, and the qualitative density of the mycelium was high in all studied replicates. Despite the material being hydrophobic, water absorption was documented – more than 200% of the original weight – and compared with previous literature. In this manner, the material constructed herein could be a candidate for treating water for human consumption. Future research on the subject is necessary.

Palabras clave: biosorción, economía circular, micomaterial, ingeniería, sostenibilidad, tratamiento de aguas.

Keywords: biosorption, circular economy, engineering, mycomaterial, sustainability, water treatment.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Introducción

Las características de los hongos hacen que sean importantes y favorables desde el punto de vista de aplicaciones humanas. Con ellos se pueden construir biomateriales a partir del crecimiento del micelio en combinación con un sustrato orgánico o inorgánico que le provea al hongo los nutrientes necesarios (Appels et al. 2019). Los materiales formados por el micelio utilizan la característica de unión de las hifas para conglomerar partículas de un sustrato y así crear diversas formas o estructuras (Alemu et al. 2022). Dentro del grupo de los hongos que presenta mejores características para la formación de materiales se encuentran las especies *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm y *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst. (Angelova et al. 2021; Alemu et al. 2022).

Los biomateriales realizados a partir del micelio fúngico han venido en auge y en su mayoría han sido utilizados como sustitutos del poliestireno expandido y como reemplazo de algunos materiales de construcción y algunos otros con propiedades aislantes de sonido (Elsacker et al. 2019). Hay biomateriales que pueden funcionar como filtros y que han sido investigados para procesos de biofiltración en medios líquidos o gaseosos (Garzón-Zúñiga et al. 2012). Para estos procesos se pueden emplear, como medio activo, las virutas de madera y diferentes tipos de piedras o gravas (Ghasemi et al. 2020). Estos biofiltros también pueden usar microorganismos, como hongos o bacterias u organismos más grandes como plantas, para adsorber o degradar los elementos contaminantes (Pachaiappan et al. 2022). El uso de hongos en métodos de biofiltración es conocido como micofiltración (Mehta et al. 2017).

Pleurotus ostreatus es capaz de degradar lignina, celulosa y hemicelulosa (Vaverková et al. 2018). Este hongo puede crecer y ser cultivado en diversos sustratos lignocelulósicos. Además, presenta ventajas para su investigación debido a que se adapta fácilmente a condiciones y materiales de trabajo de laboratorio, es de fácil manejo y posee un crecimiento relativamente rápido (Palin et al. 2016). El cultivo o elaboración de biomateriales con el hongo es, además, de bajo costo (Kapahi and Sachdeva 2017). Debido a lo anterior y a que la investigación de materiales biológicos en Costa Rica no se ha enfocado en hongos, en este proyecto los objetivos primarios fueron 1) caracterizar el crecimiento de una cepa de *P. ostreatus* sobre una matriz de sustrato orgánico comercial para determinar la curva de crecimiento del hongo y la porosidad del material resultante y 2) determinar las propiedades físicas e hidráulicas del material formado a partir de la matriz de sustrato orgánico y el micelio del hongo. Lo anterior tiene el potencial de ofrecer información técnica para el planteamiento de un material como biofiltro de aguas contaminadas.

Bajo el marco de trabajo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el aporte de un proyecto como el expuesto acá puede tener impacto en metas e indicadores relacionados con los objetivos de salud y bienestar; agua limpia y saneamiento y el tema de industria, innovación e infraestructura (<https://www.un.org/sustainabledevelopment>). En países como Costa Rica, y en muchos otros de Latinoamérica, el desarrollo de estos proyectos abre además la difícil puerta del trabajo multidisciplinario, tan importante y relevante para resolver los complejos problemas de la humanidad en tiempos modernos.

Materiales y métodos

Para este proyecto se utilizó una cepa comercial de primera generación de *P. ostreatus*. Esta se cultivó en un medio de Papa Dextrosa Agar (PDA) de la marca Sigma siguiendo las instrucciones del fabricante (colocando 39g de PDA en 1L de agua destilada), y autoclavando el medio a 121°C a 15 psi

por 45 minutos. La incubación se llevó a cabo a 25°C en oscuridad por 20 días. A partir de este inóculo primario se duplicó la cepa en inóculos secundarios, también llamados semilla del hongo. Con ello se aseguró tener suficiente material para poder hacer varias réplicas del biomaterial.

De forma paralela, como sustrato primario se eligió el heno conocido como “transvala” (*Digitaria eriantha* Steud.). Este heno se rompió empleando un molino de martillo y el material resultante fue tamizado para usar principalmente partículas entre 4 y 10 mm. Posteriormente, el sustrato fue lavado y exprimido para eliminar partículas pequeñas y polvo. El heno húmedo fue colocado en bolsas de polipropileno cuya apertura se enrolló y engrapó. Estas bolsas fueron introducidas en otra bolsa de polipropileno que se cerró con una cuerda y se autoclavó por 60 minutos a 121°C y 15 psi. Tras ello, todas las bolsas se dejaron enfriar en una cámara de flujo laminar previamente desinfectada.

Para la elaboración del biomaterial se usó un molde que consistió en un recipiente de plástico de polipropileno de 7 l con dimensiones de 18x30x11 cm (Fig. 1). Este se desinfectó primeramente con cloruro de benzalconio y luego con alcohol etílico al 80% dentro de la cámara de flujo laminar. Para llenar el molde se usó la semilla del hongo y el sustrato de heno preparados previamente. Cada recipiente se llenó a una altura, peso y compactación determinada y se establecieron dos tratamientos con 12 réplicas en cada tratamiento. Para cada réplica se colocó una cantidad de semilla de *P. ostreatus* equivalente al 30% del peso del sustrato (relación 30% peso/peso). Los dos tratamientos experimentados correspondieron a dos pesos húmedos de sustrato diferentes por su importancia como variable ingenieril de diseño.

Para el tratamiento 1 (T1) se rellenaron los recipientes hasta los 3 cm de altura, con un peso húmedo del sustrato de 200 g y 60 g de semilla del hongo, para un peso total de 260 g. Para el tratamiento 2 (T2) se rellenaron los recipientes hasta una altura de 5 cm, con un peso húmedo de 350 g y 105 g de semilla, para un peso total de 455 g. En todos los casos la homogenización se hizo a mano utilizando guantes. Cada recipiente se selló con un plástico que se perforó con una aguja para formar cinco hileras de tres agujeros cada una como método para asegurar el intercambio gaseoso. Los moldes resultantes se incubaron a 25°C y una humedad entre 60-80%, hasta que alcanzaron el crecimiento y densidad esperados. Se estableció que el biomaterial alcanzaría el tiempo final de crecimiento una vez que el micelio visible del material estuviera denso, compacto y muy blanco sin transparencias. Al llegar a este punto, se provocó un choque térmico al colocar los bloques del biomaterial en un horno con flujo de aire a 60°C durante 24 horas.

Se determinó la cinética de crecimiento del micelio fúngico sobre el heno a partir de 1) la curva de crecimiento, 2) la tasa de crecimiento, 3) la densidad cualitativa del micelio y 4) el tiempo final de crecimiento. Para esto, las observaciones se hicieron cada dos o tres días. Para cuantificar la curva y la tasa de crecimiento, se midió el porcentaje de área abarcado por el micelio utilizando la Ecuación 1 y el software ImageJ 1.8.0_112 a partir de fotografías de los lados superior e inferior del panel. La tasa de crecimiento (área colonizada/día) se determinó a partir del valor de la pendiente de la curva.

$$\text{Área micelio (\%)} = \left(\frac{\text{Área micelio (cm}^2\text{)}}{\text{Área total sustrato (cm}^2\text{)}} \right) * 100 \quad [\text{Ecuación 1}]$$

La densidad del micelio sobre el sustrato se registró de manera cualitativa, mediante inspección visual, los mismos días de muestreo especificados previamente. Para ello se establecieron cinco categorías de densidad cualitativa: (D1) densidad uno cuando el material mostró zonas sin micelio y hubo transparencia, (D2) densidad dos cuando el micelio colonizó la mayoría del material pero aún había transparencia, (D3) densidad tres con la mitad o un poco más del micelio blanco denso con algunos sitios blanco transparentes, (D4) densidad cuatro cuando el micelio en su mayoría era blanco con algunos sitios blanco semitransparentes y (D5) densidad cinco cuando todo el material tuvo micelio blanco (Fig. 2). El tiempo final de crecimiento se tomó como el último día en que el material alcanzó el 100% de colonización del micelio y la categoría cinco de densidad. En ese momento, se realizó el choque térmico y el producto se consideró finalizado.

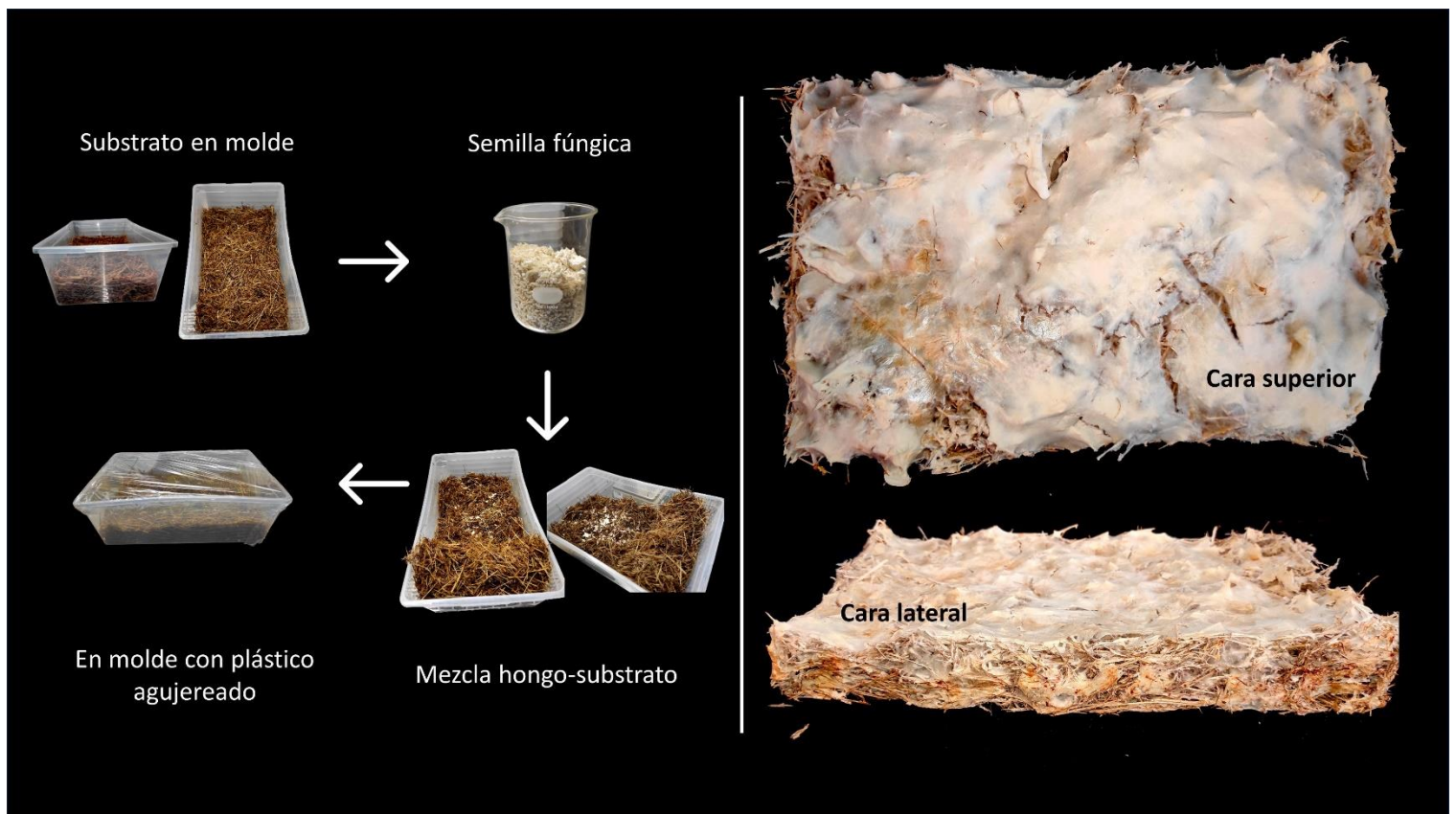


Figura 1. Resumen del protocolo usado (izquierda) y apariencia del biomaterial construido después del secado o aplicación del choque térmico (derecha). En el primero se observan los moldes usados, la apariencia de la semilla fúngica de *P. ostreatus* y el uso del plástico con agujeros. En el biomaterial se pueden observar la cara superior y lateral y las características visuales del producto.

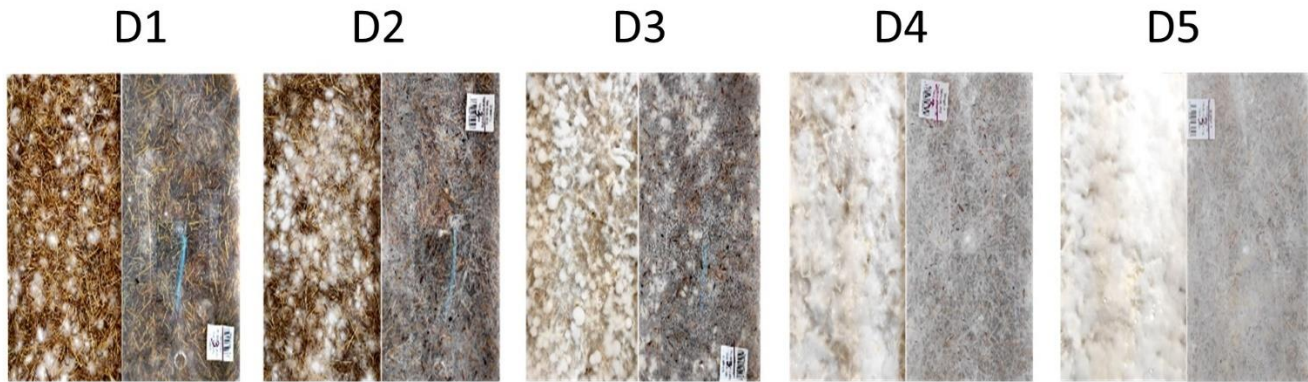


Figura 2. Densidad cualitativa del micelio de *P. ostreatus* creciendo sobre *D. eriantha* formando el biomaterial. Se muestra la progresión desde la densidad uno (izquierda) a la densidad cinco (derecha). Para cada densidad se muestran la cara superior (izquierda) e inferior (derecha) de los moldes usados en este trabajo.

Para probar el biomaterial como potencial filtro de agua, se determinaron algunas variables físicas e hidráulicas. Entre ellas, se cuantificó 1) el cambio de forma de los bloques, 2) la densidad aparente, 3) la porosidad aparente, 4) la capacidad de absorción de agua, 5) el porcentaje de absorción de agua, 6) la tasa de absorción por tiempo de contacto con el agua y 7) la capacidad de absorción por peso del panel.

Para lo anterior, primero se determinó el volumen de los bloques antes y después del secado, con seis réplicas por tratamiento, a partir de mediciones dimensionales. Con esta información se determinó el cambio de forma. Además, se pesaron los bloques antes y después del secado y con tal información, más la volumetría calculada anteriormente, se determinó la densidad aparente (en g/cm^3). La porosidad aparente se calculó con la Ecuación 2, donde ps =peso seco, ph =peso húmedo y psa =peso en saturación. Esta última variable se calculó en un paso posterior.

$$\text{Porosidad aparente (\%)} = \frac{ps - ph}{ps - psa} * 100 \quad [\text{Ecuación 2}]$$

La capacidad de absorción de agua del biomaterial se determinó realizando una curva de absorción de agua, y determinando el tiempo de saturación del material, el porcentaje de absorción de agua, la tasa de absorción (ml/hora) y capacidad de absorción (ml/g). Para cuantificar estas variables cada panel se sumergió en un recipiente con 5 litros de agua y se dejó flotar en la superficie. Cada media hora se extrajo el panel y se secó con toallas de papel tras lo que se pesó y se colocó nuevamente en el agua. Cuando se logró estabilidad en el peso, esa determinación se denominó peso saturado (psa) y el tiempo necesario para llegar a esa medición se definió como el tiempo de saturación del material. La curva de absorción se calculó graficando el cambio de peso a través del tiempo, y con la pendiente de la curva se calculó la tasa de absorción del biomaterial. La capacidad de absorción se determinó como la relación del agua absorbida entre el peso seco y el porcentaje de absorción se calculó con la Ecuación 3.

$$\text{Absorción de agua (\%)} = \frac{psa - ps}{ps} * 100 \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Con los resultados obtenidos se realizaron pruebas estadísticas – t de Student, U de Mann Whitney, – según fuera el caso, para determinar si existieron diferencias significativas entre los dos tratamientos utilizados en este proyecto. En todos los casos, se determinó primero la normalidad de los datos y se escogió la prueba adecuada según lo anterior. Se trabajó con un valor de corte de rechazo de la H_0 de 0.05, como medida de variabilidad se usó la desviación estándar y se usó el programa RStudio para llevar a cabo los cálculos.

Resultados

El material fue construido exitosamente con el protocolo propuesto en este trabajo (Fig. 2). La forma de los bloques creados se mantuvo durante el crecimiento del micelio y la matriz creada por las partículas de heno y el micelio se mantuvo siempre unida a la pared del molde. Posterior al secado, sí se observaron cambios de forma y disminuciones de las dimensiones originales.

En ambos tratamientos se formó un bloque compacto con porosidad visible en las superficies. En algunas réplicas de T1, la matriz se observó más flexible y propensa a romperse, mientras que en T2 esto nunca ocurrió. Tras el secado, el micelio algodonoso de la cara superior pasó a ser más cercano a una textura tipo “piel” y fue menos rígido que el micelio de las caras laterales e inferior (Fig. 3). El micelio de estas últimas, que siempre estuvo en contacto con el molde no varió en apariencia, pero sí se observó un poco más rígido en comparación con micelio húmedo o vivo.

El crecimiento del micelio se estabilizó al quinto día para ambos tratamientos (Fig. 4), con una cobertura de casi el 100% de las superficies respectivas. Posteriormente, el micelio siguió creciendo hasta alcanzar la totalidad del área por cubrir y la tasa de crecimiento fue similar entre los dos tratamientos ($U=40$, $p=0.06836$). La variabilidad de los datos de crecimiento entre los dos tratamientos tampoco fue diferente entre ellos (Fig. 5; $F=0.0309$, $p=0.8622$), lo que sugirió que el crecimiento del micelio fue equivalente entre las réplicas de los mismos.

El tiempo necesario para alcanzar la densidad de micelio deseada mostró ligeras diferencias entre tratamientos. Para T2 (Fig. 6) la densidad deseada fue alcanzada en promedio al día 30 mientras que para el T1 (Figura 11) tal variable fue obtenida hasta el día 32. A pesar de tal observación, el tiempo final de crecimiento del micelio no fue diferente entre tratamientos (Fig. 7; $U=94.5$, $p=0.1961$) y la variabilidad asociada a estas cuantificaciones fue similar en ambos casos ($F=0.9277$, $p=0.3459$).

En ambos tratamientos el cambio de forma del biomaterial fue similar (Fig. 8; $U=21$, $p=0.6889$), con una variación media (disminución en las dimensiones) de 40% aproximadamente respecto al material húmedo antes del secado. Sin embargo, con T2 se observó una mayor variabilidad en los datos ($F=5.2244$, $p=0.04535$) que con T1. De forma similar, ambos tratamientos mostraron una densidad aparente similar (Fig. 9; $t=0.7799$, $df=5.3722$, $p=0.4684$), pero la variabilidad de los datos fue mayor para T2 que para T1 ($F=7.9813$, $P=0.018$). La porosidad aparente en ambos tratamientos fue equivalente y no hubo diferencias (Fig 10; $t=0.076062$, $df=3.0994$, $p=0.944$).

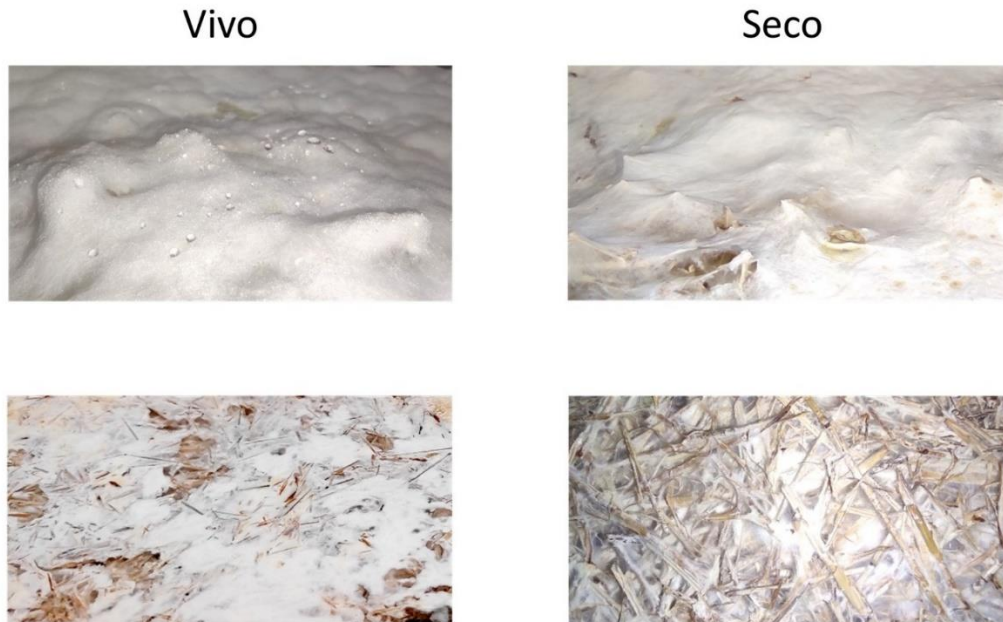


Figura 3. Textura del micelio de *P. ostreatus* sobre *D. eriantha* en el último día de generación del biomaterial. A la izquierda se muestran las fotografías antes del secado y a la derecha las obtenidas posterior al secado durante 24 horas a 60°C. Las imágenes de la parte superior corresponden a la cara superior del biomaterial y las inferiores a la cara inferior del mismo.

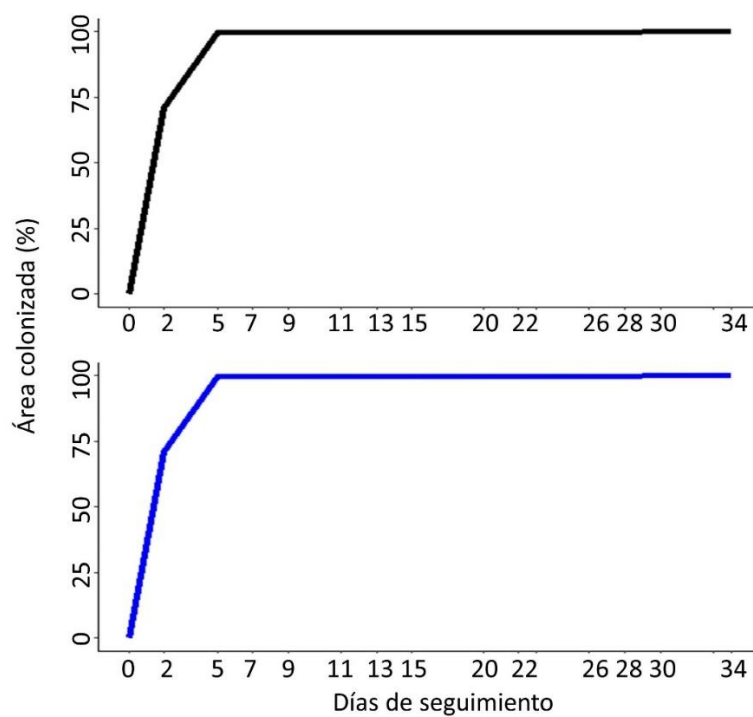


Figura 4. Curvas de crecimiento del micelio de *P. ostreatus* sobre *D. eriantha* durante un periodo de 34 días con un total de 16 mediciones en lapsos de dos o tres días. T1 arriba y T2 abajo.

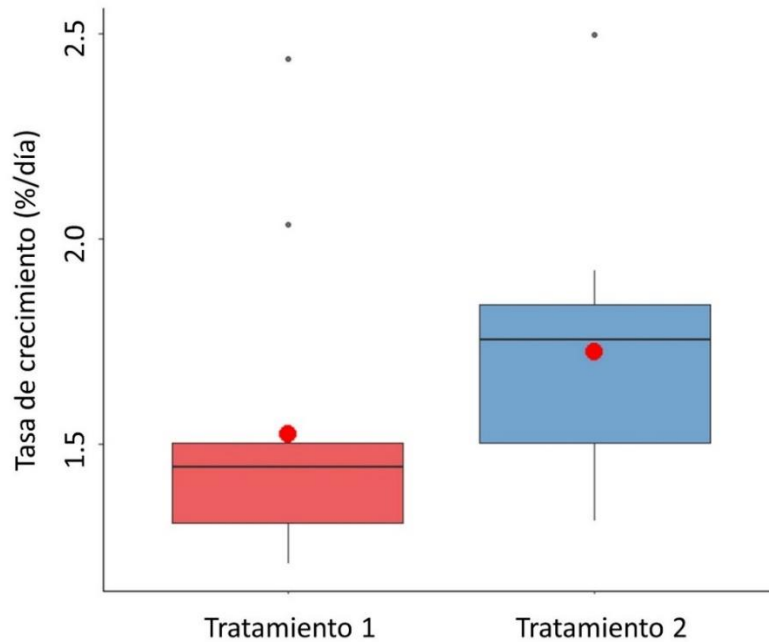


Figura 5. Rangos y variabilidad de crecimiento (%/día) del micelio de *P. ostreatus* sobre *D. eriantha* durante la construcción del biomaterial. El punto rojo muestra la media para cada tratamiento.

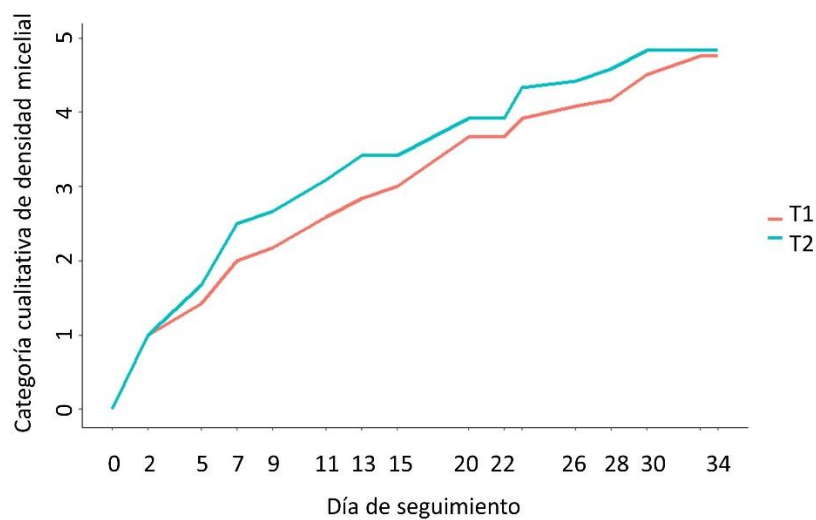


Figura 6. Cambio temporal en la densidad cualitativa del micelio de *P. ostreatus* sobre *D. eriantha* durante 34 días de crecimiento, según tratamiento.

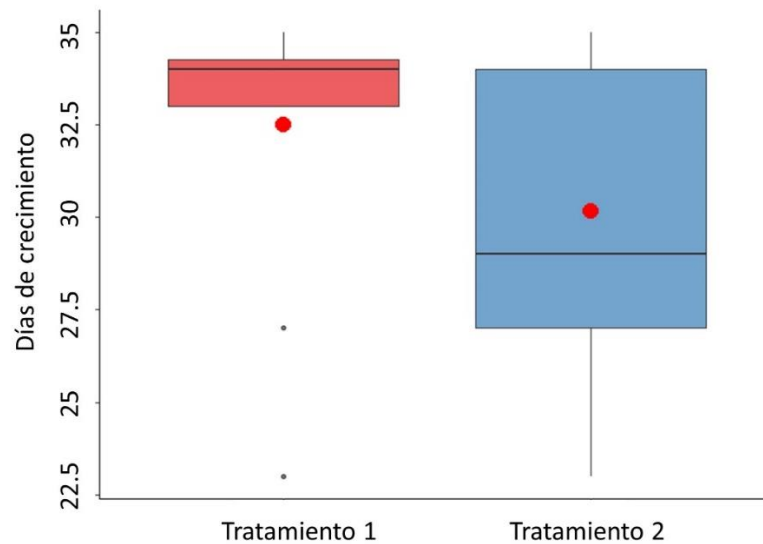


Figura 7. Rangos y variabilidad de los tiempos finales (en días) de crecimiento del micelio de *P. ostreatus* sobre *D. eriantha* según tratamiento. El punto rojo muestra la media para cada tratamiento.

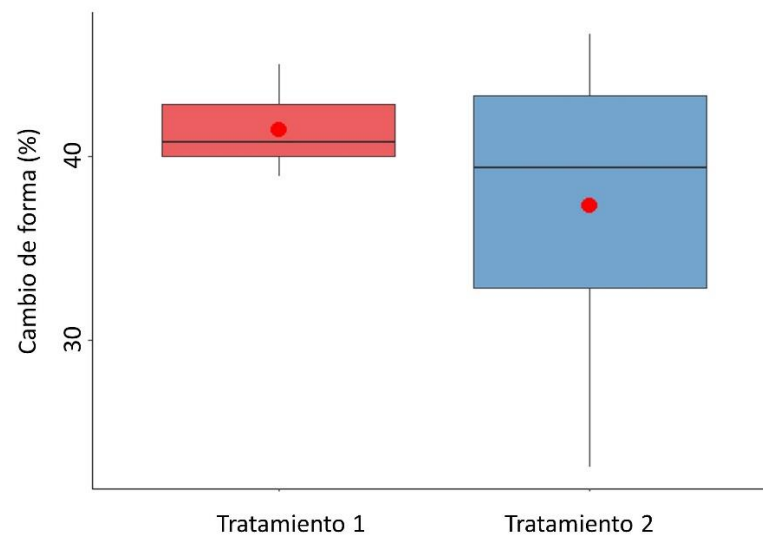


Figura 8. Porcentaje del cambio de forma, en volumen, de los bloques construidos con micelio de *P. ostreatus* sobre *D. eriantha* después del secado en horno a 60°C por 24 horas. El punto rojo muestra la media para cada tratamiento.

La absorción de agua por parte del biomaterial fue rápida y tuvo un pico alrededor de los 30 minutos (0.5 horas, Fig. 11). Posterior a este tiempo, el biomaterial continuó absorbiendo agua, pero en menor cantidad, hasta que se estabilizó en un tiempo de saturación cercano a las 5.5 horas. El porcentaje de absorción de agua del biomaterial, entre ambos tratamientos, al finalizar las 6.5 horas fue diferente (Fig. 12; $t = 5.0618$, $df = 3.526$, $p = 0.00996$). El biomaterial de T2 absorbió más cantidad de agua

porcentualmente, con 236% de su peso seco, comparado con 208% para T1. Además, T1 tuvo una mayor variabilidad en esa cuantificación ($F= 23.027$ $p=0.003005$), y T2 fue más constante en la cantidad de agua absorbida en cada réplica.

Se observó una mayor tasa de absorción durante las 6.5 horas del experimento en T2 que en T1 (Fig. 13; $U= 0$ $p= 0.0285$) pero la variabilidad de los datos fue similar entre tratamientos ($F= 2.9606$ $p= 0.1361$). De forma similar, T2 mostró una mayor capacidad de absorción de agua en comparación con T1 (Fig. 14; $t= 5.0618$, $df= 3.526$, $p= 0.00996$), que a su vez mostró menos variabilidad que T2 para este parámetro ($F= 23.027$, $P= 0.003005$).

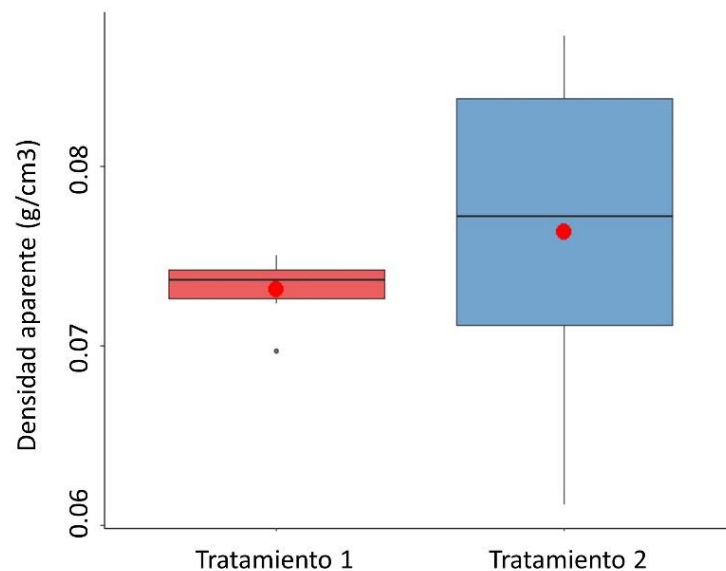


Figura 9. Densidad aparente (g/cm^3) del biomaterial construido con micelio de *P. ostreatus* sobre *D. eriantha* posterior al secado en horno a 60°C por 24 horas. El punto rojo muestra la media para cada tratamiento.

Discusión

Se ha observado previamente que el micelio de *P. ostreatus* crece de manera rápida en diferentes tipos de paja o heno (e.g., Melanouri *et al.* 2022). Con cáscara de arroz, el micelio de este hongo ha cubierto por completo el sustrato en ocho días (Nashiruddin *et al.* 2022) y con salvado de trigo se ha visto una colonización completa alrededor de los 12 días (Joshi *et al.* 2020). En el presente estudio, independientemente del tratamiento, fue alrededor del quinto día donde se registró una colonización completa del sustrato. Sin embargo, además del sustrato, otro factor relevante que afecta la tasa o velocidad de crecimiento es la cantidad de inóculo usado. Según Nashiruddin *et al.* (2022), lo óptimo es utilizar una cantidad de inóculo del 40% peso/peso, muy similar al 30% usado en este trabajo. Así, lo realizado acá muestra además, que seguramente existe algún grado de variabilidad en la respuesta de crecimiento ante diferentes cantidades de inóculo inicial y que tal patrón merece ser estudiado para los fines de producción de biomateriales similares al mostrado en este trabajo.

Otros factores que pueden afectar la respuesta final de crecimiento son la heterogeneidad y compactación del sustrato. Se conoce que en sustratos más heterogéneos el crecimiento es más lento (Membrillo *et al.* 2011) y que cuando el material está muy compactado se reduce la presencia de hifas (Appels *et al.* 2019). En el presente proyecto, los puntos de crecimiento del micelio aparecieron distribuidos por todo el material en los primeros días de crecimiento lo que sugiere que el homogenizado y compactación usados fueron adecuados. A pesar de lo anterior, sería interesante establecer algún parámetro de análisis para ambos factores (e.g., hacer algún experimento variando ambos factores) para estudiar las respuestas de forma más sistemática e integrada.

En todo caso, se ha comunicado que la duración para completar el crecimiento fúngico asociado con un biomaterial como el construido acá muestra un rango entre cinco y 42 días (Gan *et al.* 2022; Manan *et al.* 2021) y los problemas de contaminación son muy relevantes en el establecimiento de tales límites temporales. En ese sentido, un aspecto por rescatar del presente estudio fue la baja o nula contaminación del biomaterial durante la etapa de crecimiento micelial. Esto demostró que los protocolos utilizados tanto en la formación del material como en la toma de los datos permitieron mantener tal factor bajo completo control. En todo caso, lo anterior también está relacionado con la rapidez con la que crece el micelio, ya que cuando se incrementa la tasa de penetración del sustrato se reduce la competencia con otros organismos que pueden contaminar el material (Nashiruddin *et al.* 2022).

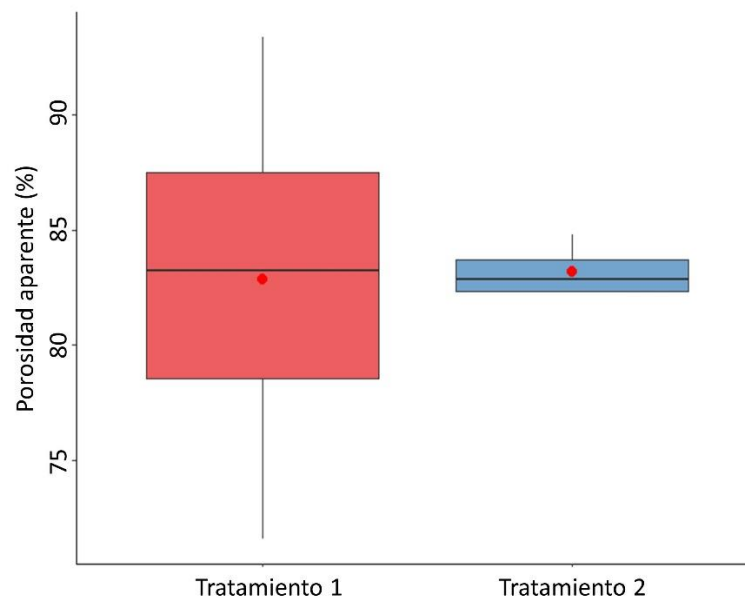


Figura 10. Porosidad aparente (%) del biomaterial a partir de los pesos del material (el peso húmedo, el peso seco y el peso saturado medido en la prueba de absorción de agua). El punto rojo muestra la media para cada tratamiento.

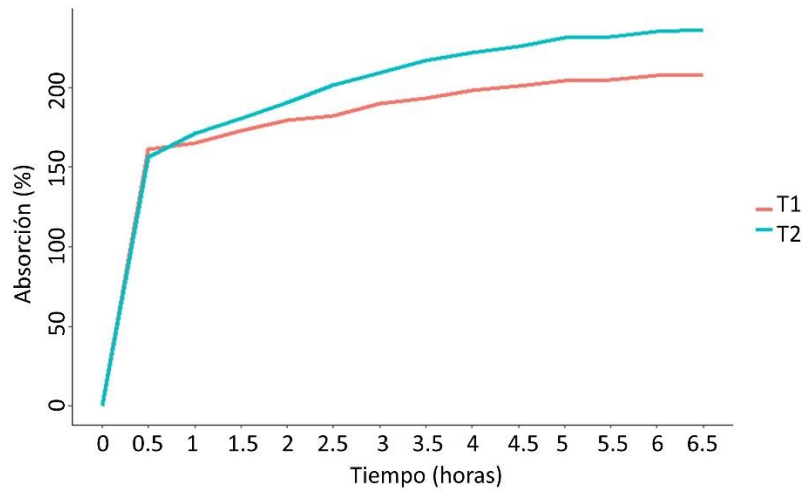


Figura 11. Curva del porcentaje de absorción de agua por parte del biomaterial seco hasta estabilización alrededor de 6.5 horas, para un total de 14 mediciones en lapsos de cada media hora.

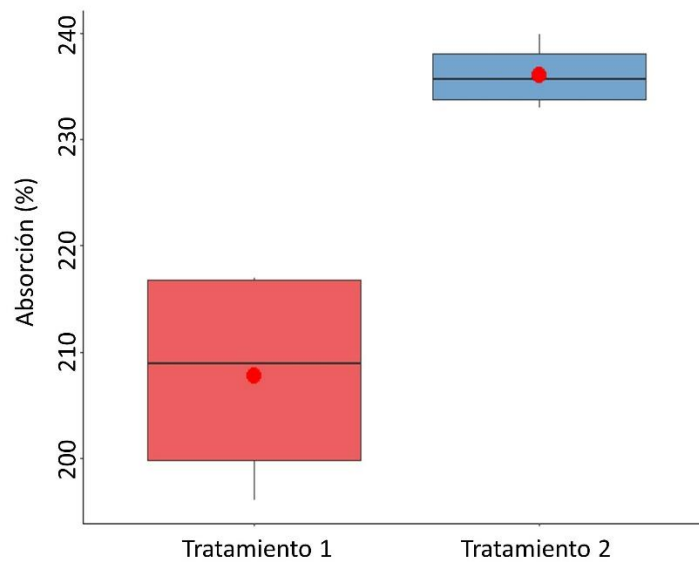


Figura 12. Porcentaje final de absorción de agua del biomaterial al finalizar las 6.5 horas de mantenerse sumergido. El punto rojo muestra la media para cada tratamiento.

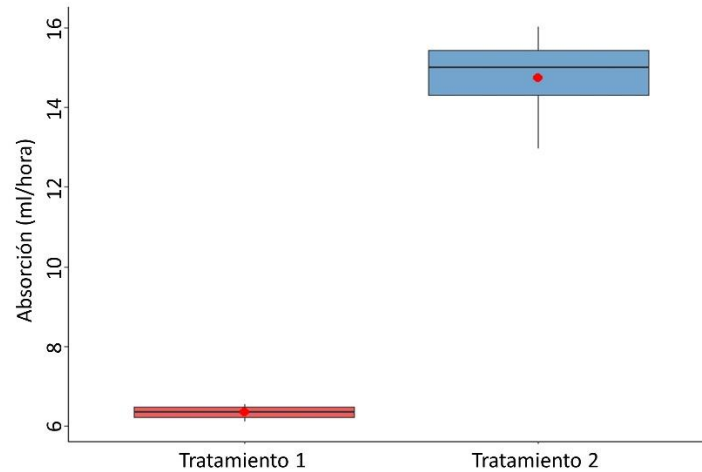


Figura 13. Tasa de absorción de agua (ml/hora) del biomaterial durante 6.5 horas. El punto rojo muestra la media para cada tratamiento.

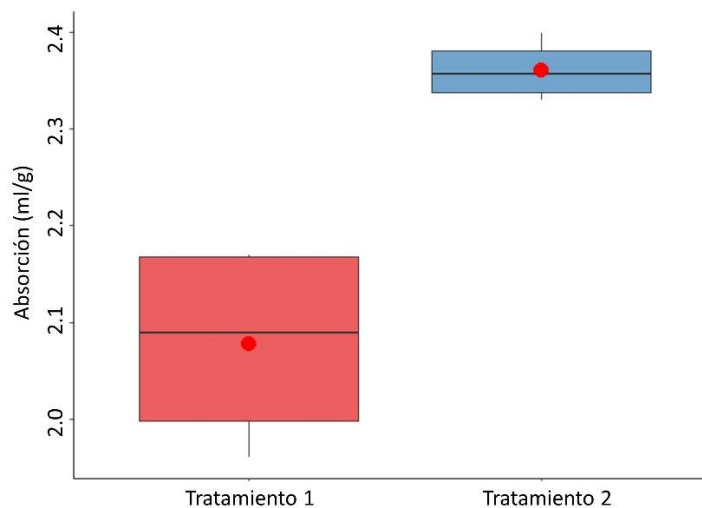


Figura 14. Cantidad de agua absorbida por gramo (ml/g) por el biomaterial tras 6.5 horas sumergido. El punto rojo muestra la media para cada tratamiento.

En este estudio, cuando se finalizó el periodo de crecimiento micelial, se registró un micelio denso y blanco con textura algodonosa en la cara superior y un micelio tipo “piel” en la cara inferior. Esta observación fue consistente independientemente del tratamiento. Tal observación ya ha sido comunicada previamente (Appels *et al.* 2019). De forma similar, los cambios asociados con la densidad micelial del biomaterial en el tiempo, registrados acá con las diferentes densidades cualitativas, también fueron consistentes con literatura previa (e.g., Haneef *et al.* 2017) donde se indica que alrededor de los 20 días debería de observarse un micelio compacto pero poroso. De esta forma, y también con base en los resultados anteriores, se puede concluir que la diferencia inicial de masas (que determinó los tratamientos) no es un factor determinante ni en el crecimiento del micelio ni en la producción del biomaterial. Así,

dependerá más bien, de la función para la que se cree el biomaterial, que se determine una mayor o menor masa inicial de sustrato colonizable. Desde el punto de vista ingenieril, tales variaciones de un mismo biomaterial deberían de ser caracterizadas.

En términos de la posible utilidad del biomaterial como filtro y particularmente con respecto a los cambios de forma, se ha reportado que el promedio de disminución en el tamaño del material, posterior al secado, oscila entre 5-40% (Elsacker et al. 2019). El cambio de forma observado en este estudio, para ambos tratamientos fue precisamente el máximo reportado en la literatura. De forma similar, el material construido acá presentó densidades en el rango de 0.061 a 0.087 g/cm³, lo que se podría considerar como una densidad baja. Materiales con esas densidades se clasifican dentro de espumas tipo poliestireno expandido, que puede llegar hasta 0.03 g/cm³ (Sivaprasad et al. 2021). En el caso del presente estudio, el biomaterial producido tuvo densidades mayores al poliestireno expandido, pero la mayor variabilidad en T2 podría afectar su uso cuando se necesiten densidades definidas.

De forma similar, los porcentajes de absorción pueden variar bastante dependiendo del sustrato. Por ejemplo, en un material de *P. ostreatus* con serrín como sustrato, el porcentaje de absorción fue de 120-185% (Sivaprasad et al. 2021), con serrín y bagazo de caña fue de 131-237% (Joshi et al. 2020) y con sustrato de paja de arroz fue de 122-148% (Lee and Choi, 2021). El biomaterial producido aquí presentó porcentajes de absorción de entre 140% a 331%, que son mayores que cualquiera de los anteriores. Aunque T1 tuvo porcentajes más bajos que T2, de igual manera la absorción de agua se consideró alta. De igual forma, las características hidráulicas como el porcentaje de absorción de agua y la cantidad de agua absorbida por gramo del biomaterial también variaron entre tratamientos. En estos casos, T2 mostró los mejores resultados quizás por la cantidad de masa disponible para la absorción. Por lo tanto, para el biomaterial producido aquí, la porosidad alta en ambos tratamientos seguramente derivó en el alto porcentaje de absorción de agua observado.

Para efectos de que el material sea considerado un filtro, parece que las características de los bloques contruidos acá si cumplen con lo requerido. En materiales empleados dentro de procesos de absorción, cuando existe una alta porosidad se incrementa la biosorción debido a que hay más sitios activos o área superficial (Jin et al. 2018). Tal biosorción tendrá un mayor efecto filtrador en tanto el material tenga especificidad (Lee and Choi, 2021), por lo que la relación entre esas variables es importante para definir el uso. De esta forma, con lo mostrado en el presente estudio se puede concluir que existe viabilidad para construir un biomaterial como el expuesto acá y para proponerlo como un potencial filtro de agua. En investigaciones previas se ha documentado que *P. ostreatus* puede remover *Escherichia coli* (Pini and Geddes, 2020) o incluso algunos hidrocarburos, contaminantes agrícolas, tintes o productos farmacéuticos (Akhtar and Mannan, 2020) del agua. Así, es claro que la línea de investigación acá estudiada debe ser documentada con una serie de futuros experimentos dirigidos a establecer los detalles técnicos de un potencial biomaterial que cumpla con criterios de producción ingenieril.

Agradecimientos

Se agradece a Pedro Rojas Camacho por el préstamo de equipos y la guía para elaborar los bloques usados en esta investigación. De igual forma, se agradece a Dennis Sánchez por su apoyo logístico y a Julieta Carranza por la adquisición de la cepa comercial de *P. ostreatus*. Este estudio recibió apoyo del proyecto 731-B8-900 (Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica).

Referencias

- Akhtar N, Mannan MA. 2020. Mycoremediation: expunging environmental pollutants. *Biotechnol Rep.* 26: e00452
- Alemu D, Tafesse M, Mondal AK. 2022. Mycelium-based composite: the future sustainable biomaterial. *Int J Biomater.* 2022: 8401528.
- Angelova GV, Brazkova MS, Krastanov AI. 2021. Renewable mycelium based composite – sustainable approach for lignocellulose waste recovery and alternative to synthetic materials – a review. *Z Naturforsch C J Biosci.* 76 (11–12): 431-442.
- Appels FVW, Camere S, Montalti M, Karana E, Jansen KMB, Dijksterhuis J, Krijgsheld P, Wösten HAB. 2019. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Mater Des.* 161: 64-71.
- Arifin YH, Yusuf Y. 2013. Mycelium fibers as new resource for environmental sustainability. *Procedia Eng.* 53: 504-508.
- Elsacker E, Vandeloock S, Brancart J, Peeters E, De Laet L. 2019. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS ONE* 14(7): 1-20.
- Gan JK, Soh E, Saeidi N, Javadian A, Hebel DE. 2022. Temporal characterization of biocycles of mycelium - bound composites made from bamboo and *Pleurotus ostreatus* for indoor usage. *Sci Rep.* 12: 19362.
- Garzón-Zúñiga MA, Buelna G, Moeller-Chávez GE. 2012. La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnol Cienc Agua.* 3(3): 153-161.
- Ghasemi R, Golbabaei F, Rezaei S, Pourmand MR, Nabizadeh R, Jafari MJ, Masoorian E. 2020. A comparison of biofiltration performance based on bacteria and fungi for treating toluene vapors from airflow. *AMB Express* 10(1): 8.
- Haneef M, Ceseracciu L, Canale C, Bayer IS, Heredia-Guerrero JA, Athanassiou A. 2017. Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties. *Sci Rep.* 7: 41292.

- Jin Y, Teng C, Yu S, Song T, Dong L, Liang J, Bai X, Liu X, Hu X, Qu J. 2018. Batch and fixed-bed biosorption of Cd(II) from aqueous solution using immobilized *Pleurotus ostreatus* spent substrate. *Chemosphere* 191: 799-808.
- Joshi K, Meher MK, Poluri KM. 2020. Fabrication and characterization of bioblocks from agricultural waste using fungal mycelium for renewable and sustainable applications. *ACS Appl. Bio Mater.* 3(4): 1884-1892.
- Kapahi M, Sachdeva S. 2017. Mycoremediation potential of *Pleurotus* species for heavy metals: a review. *BIOB.* 4(1): 32.
- Lee T, Choi J. 2021. Mycelium-composite panels for atmospheric particulate matter adsorption. *Results Mater.* 11: 100208.
- Manan S, Ullah MW, Ul-Islam M, Atta OM, Yang G. 2021. Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials. *J Bioresour Bioprod.* 6(1): 1-10.
- Mehta A, Dubey R, Kumar S. 2017. Mycofiltration: a step towards sustainable environment. *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 6(6): 1524-1528.
- Melanouri E, Dedousi M, Diamantopoulou P. 2022. Cultivating *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus eryngii* mushroom strains on agro-industrial residues in solid-state fermentation. Part I: Screening for growth, endoglucanase, laccase and biomass production in the colonization phase. *CRC.* 5(1): 61-70.
- Membrillo I, Sánchez C, Meneses M, Favela E, Loera O. 2008. Effect of substrate particle size and additional nitrogen source on production of lignocellulolytic enzymes by *Pleurotus ostreatus* strains. *Bioresour Technol.* 99: 7842-7847.
- Nashiruddin IN, Shin KC, Fadziyana AM, Rahman RA, Choy JL, Wan NA, El Enshasy H. 2022. Effect of growth factors on the production of mycelium-based biofoam. *Clean Technol Environ Policy.* 24: 351-361.
- Pachaiappan R, Cornejo-Ponce L, Rajendran R, Manavalan K, Femilaa Rajan V, Awad F. 2022. A review on biofiltration techniques: recent advancements in the removal of volatile organic compounds and heavy metals in the treatment of polluted water. *Bioengineered* 13(4): 8432-8477.

Palin D, Rufato KB, Linde GA, Colauto NB, Caetano J, Alberton O, Jesus DA, Dragunski DC. 2016. Evaluation of Pb (II) biosorption utilizing sugarcane bagasse colonized by Basidiomycetes. *Environ Monit Assess.* 188(5): 279.

Pini AK, Geddes P. 2020. Fungi are capable of mycoremediation of river water contaminated by *E. coli*. *Water, Air, and Soil Pollut.* 231: 83.

Sivaprasad S, Byju SK, Prajith C, Shaju J, Rejeesh CR. 2021. Development of a novel mycelium bio-composite material to substitute for polystyrene in packaging applications. *Mater Today: Proc.* 47(15): 5038-5044.

Vaverková MD, Adamcová D, Radziemska M, Voběrková S, Mazur Z, Zloch J. 2018. Assessment and evaluation of heavy metals removal from landfill leachate by *Pleurotus ostreatus*. *Waste and Biomass Valorization* 9(3): 503-511.