



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos
(FoodUPV)

Uso potencial de materiales de envasado a base de micelio
para aplicaciones alimentarias

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos

AUTOR/A: Santos Iparraguirre, Marta

Tutor/a: Martín Esparza, María Eugenia

Cotutor/a: González Martínez, María Consuelo

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

USO POTENCIAL DE MATERIALES DE ENVASADO A BASE DE MICELIO PARA APLICACIONES ALIMENTARIAS

Marta Santos Iparraguirre, María Eugenia Martín Esparza¹ y María Consuelo González Martínez¹.

RESUMEN

En este trabajo se desarrollaron y caracterizaron dos tipos de biocomposite a base de micelio fúngico, uno tipo espuma y otro termocomprimido, en línea con una economía circular y el desarrollo de envases biodegradables, con el objetivo de evaluar su viabilidad como materiales de envasado de alimentos. Para ello, se utilizó el hongo *Ganoderma resinaceum* y, como sustrato, paja de arroz. Una vez optimizado el proceso de obtención, los biocomposites se secaron y para obtener la muestra termocomprimida, el biocomposite tipo espuma se sometió a un proceso de termocompresión con una prensa de platos calientes. Los materiales se caracterizaron en términos de contenido en agua y actividad de agua, dimensiones, densidad, capacidad de absorción de agua y aumento de volumen durante la rehidratación, propiedades mecánicas, barrera al vapor de agua y térmicas. Los resultados mostraron que los materiales presentaron una baja densidad, bajo contenido en humedad y actividad de agua y una estabilidad a la degradación térmica intermedia entre el sustrato y el micelio fúngico. Además, sus propiedades mecánicas y capacidad de absorción de agua se vieron significativamente afectadas por el proceso de termocompresión. Así, las muestras termocomprimidas fueron más rígidas y resistentes mecánicamente y con menor capacidad de absorción de agua que las tipo espuma, con propiedades barrera similares a otros materiales biodegradables como los basados en almidón. Por sus propiedades, estos materiales tipo espuma tiene un alto potencial para poderse utilizar como materiales aislantes térmicos o como bandejas, en el caso de los termocomprimidos, para alimentos secos o con humedad intermedia.

Palabras clave: envases, alimentos, biodegradable, biocomposite.

RESUMN

En aquest treball es van desenvolupar i van caracteritzar dos tipus de biocomposite a base de miceli fúngic, un tipus espumeja i un altre termocomprimido, en línia amb una economia circular i el desenvolupament d'envasos biodegradables, amb l'objectiu d'avaluar la seua viabilitat com a materials d'envasament d'aliments. Per a això, es va utilitzar el fong *Ganoderma resinaceum* i com substrat, palla de´arròs. Una vegada optimitzats el procés d'obtenció, els biocomposites es van assecar i per a obtindre la mostra termocomprimida, el biocomposite tipus espuma es va sotmetre a un procés de termocompresión amb una premsa de plats calents.

¹ Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n. E46022. València, España.

Els materials es van caracteritzar en termes de contingut en aigua i activitat d'aigua, dimensions, densitat, capacitat d'absorció d'aigua i augment de volum durant la rehidratació, propietats mecàniques, barrera al vapor d'aigua i tèrmiques. Els resultats van mostrar que els materials van presentar una baixa densitat, sota contingut en humitat i activitat d'aigua, i una estabilitat a la degradació tèrmica intermèdia entre el substrat i el miceli fúngic. A més, les seues propietats mecàniques i capacitat d'absorció d'aigua es van veure significativament afectades pel procés de termocompressió. Així, les mostres termocomprimidas van ser més rígides i resistents mecànicament i amb menor capacitat d'absorció d'aigua que les tipus espumeja, amb propietats barrera similars a altres materials biodegradables com els basats en midó. Per les seues propietats, aquests materials tipus espuma té un alt potencial per a poder-se usar com a materials aïllants tèrmics o com a safates, en el cas dels termocomprimidos, per a aliments secs o amb humitat intermèdia.

Paraules clau: envasos, aliments, biodegradable, biocomposite.

ABSTRACT

In this work, two types of mycelium-based biocomposites were developed and characterized, one foam type and the other thermocompressed, in line with a circular economy and the development of biodegradable packaging, with the aim of evaluating their viability as food packaging materials. To this aim, *Ganoderma resinaceum* fungus and rice straw as a substrate were used. Once the production process was optimized, the biocomposites were dried. In order to obtain the thermocompressed sample, the foam-type biocomposite was subjected to a thermocompression process using a hot plate press. The materials were characterized in terms of water content and water activity, dimensions, density, water absorption capacity and volume increment after rehydration, mechanical properties, water vapor barrier and thermal properties. The results showed that the materials presented a low density, low moisture content and water activity, and a thermal stability in between the substrate and the fungal mycelium stabilities. In addition, the mechanical properties and water absorption capacity were significantly affected by the thermocompression process. Thus, the thermocompressed samples were more rigid and mechanically resistant, and with less water absorption capacity than the foam type and they exhibited barrier properties similar to other biodegradable materials based on starch. Due to their properties, these foam-type materials have a high potential to be used as thermal insulating materials, or as trays for dry or intermediate moisture foods in the case of the thermocompressed biocomposite.

Key words: packaging, food, biodegradable, mycelium-based biocomposite.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la preocupación por buscar alternativas a los materiales tradicionales de envasado ha llevado a la investigación y desarrollo de nuevas fuentes como materiales para la fabricación de envases. En concreto, la creciente demanda actual de materiales sostenibles para contribuir al establecimiento de una economía circular ha originado gran interés por la búsqueda y el uso de materiales naturales que sustituyan a los materiales no renovables que se emplean en la mayoría de los casos (Sun *et al.*, 2022).

Los materiales biobasados, aquellos derivados de fuentes biológicas en vez de fuentes de petróleo, parecen ser una buena alternativa para poder cumplir con estos nuevos requisitos de sostenibilidad. Algunos de los principales tipos de materiales biobasados empleados actualmente en la industria son los materiales de envasado a base de fibras de madera, que emplean la celulosa como biopolímero estructural fundamental, o los bioplásticos biodegradables, como el ácido poliláctico (PLA) o el polihidroxialcanoato (PHA) (Stark y Matuana, 2021).

Otra alternativa de envasado biobasado y biodegradable, que está tomando relevancia en los últimos años, es el uso de residuos lignocelulósicos, procedentes de la agricultura y de la madera, como sustrato ideal para el crecimiento de organismos como los hongos filamentosos (Sun *et al.*, 2022). Estos hongos son capaces de formar lo que se conoce como biocomposites a base de micelio (Alemu *et al.*, 2022). Gracias a este fenómeno se ha descubierto una nueva línea de materiales naturales de envasado biodegradables, que cumplen con el objetivo de alcanzar una economía circular y que pueden tener numerosas aplicaciones, entre ellas, la del envasado de alimentos (Aiduang *et al.*, 2022; Alemu *et al.*, 2022).

Los hongos son organismos capaces de dar cohesión a los materiales a través de sus hifas que, en su conjunto, forman el micelio o cuerpo vegetativo. Durante el crecimiento de sus hifas a lo largo del tiempo, los hongos van colonizando y degradando parcialmente el sustrato y, progresivamente, unen y cohesionan la biomasa lignocelulósica, creando una matriz tridimensional (Girometta *et al.*, 2019). Existen varios métodos para conseguir producir los biocomposites a base de micelio (Girometta *et al.*, 2019).

Las etapas básicas generales de esta tecnología son: el cultivo de la cepa de hongo, la preparación del sustrato lignocelulósico, la inoculación del hongo en el sustrato, el crecimiento en el molde, la inactivación y, finalmente, la preparación comercial (Alemu *et al.*, 2022).

Existen principalmente dos tipos de biocomposite que se han desarrollado hasta el momento. Por un lado, están los denominados foams, o espumas micelares, y por otro lado están los compuestos tipo sándwich. Los foams se elaboran sometiendo al molde a un secado sin presión, creando estructuras de baja densidad, pudiendo someterse posteriormente a un proceso de prensado para convertirlos en materiales de alta densidad, denominados paneles. Los compuestos tipo sándwich se caracterizan por presentar una

estructura multicapa, donde el material de esta capa interna es similar a la de las espumas micelares, mientras que las capas externas están constituidas por material lignocelulósico (Girometta *et al.*, 2019).

Los biocomposites a base de micelio pueden experimentar grandes variaciones en sus características finales, según las especies de hongos empleadas, la composición y estructura del sustrato y las condiciones de incubación (Girometta *et al.*, 2019). En general, destaca su eficacia como aislantes térmicos y acústicos (Girometta *et al.*, 2019), sus valores de fuerza de compresión similares a los de otras espumas sintéticas y su estructura característica de red tridimensional con huecos vacíos en su interior (Aiduang *et al.*, 2022).

El uso de biocomposites a base de micelio fúngico puede suponer una nueva oportunidad en la búsqueda y aplicación de materiales biodegradables. Gracias a sus propiedades mecánicas y a sus características como aislantes, su uso puede resultar interesante en la industria de la construcción, del envase y del embalaje. Sin embargo, existe escasa literatura científica sobre su uso y aplicación como materiales de envasado alternativos para alimentos y las aplicaciones conocidas hoy en día para la industria de los envases alimentarios resultan escasas.

El objetivo del presente trabajo ha sido desarrollar y caracterizar biocomposites, tipo espuma y termocomprimidos, a base de micelio para evaluar su posible uso como materiales de envasado de alimentos. Para ello, se realizó un escalado del crecimiento del hongo desde medios generales hasta el sustrato final, para el desarrollo del material de envasado, se definieron las condiciones de termocompresión más adecuadas y se evaluaron las propiedades físicas, propiedad barrera al vapor de agua, propiedades mecánicas, capacidad de absorción de agua y degradabilidad térmica de los materiales obtenidos.

Actualmente, la creciente importancia por alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 (ODS) establecidos por las Naciones Unidas en la última década, ha llevado a la búsqueda de estrategias para cumplir con las metas marcadas, muchas de ellas relacionadas con proteger el planeta, y en esta búsqueda por cumplir ese objetivo, este trabajo presenta una alineación con el ODS N.º 2 “Hambre cero”, ODS N.º 12 “Producción y consumo responsables”, ODS N.º 14 “Vida submarina” y el ODS N.º 15 “Vida de ecosistemas terrestres”.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Se trabajó con una cepa de la especie *Ganoderma resinaceum* (ZIM L056), obtenida de la colección de cultivos industriales de Eslovenia (ZIM), de la Universidad de Liubliana. Como medio de cultivo se empleó agar de patata dextrosa (PDA) (Scharlab, España) y cultivo líquido de extracto de malta (Scharlab, España). Como sustratos de crecimiento se emplearon granos de trigo (Rincón del Segura, España) y paja de arroz (Valencia, España). El pentóxido de difósforo (P_2O_5) y el nitrato de magnesio ($Mg(NO_3)_2$) se adquirieron en PanReac Química S.L.U (España).

2.2 Obtención de los biocomposites y acondicionamiento

2.2.1 ESCALADO DEL CRECIMIENTO DEL HONGO PARA EL DESARROLLO DEL BIOCOSPOSITE

El primer paso para la creación de este tipo de material de envasado fue la selección de la cepa de hongo con la que se trabajó y su posterior cultivo y crecimiento desde medios de cultivos sólidos hasta el sustrato lignocelulósico final. Todos los procesos de inoculación se realizaron en cabinas de flujo laminar de seguridad tipo II (Telstar, EE.UU), con materiales previamente esterilizados.

Se inoculó, por el método de siembra en tres puntos, el hongo seleccionado en agar PDA (24 g/L) sobre placas Petri y se trasladó a la incubadora (J.P. Selecta, España) para proceder a su incubación a 25 °C, 85-95% de humedad relativa (H.R.), durante 7 días. Tras observar un crecimiento notable en placa, se transfirió el inóculo a un medio de cultivo líquido de extracto de malta (40 g/L) contenido en tarros de vidrio con sistema de inyección y filtro de aire, y se incubó también a 25 °C, 85-95% de H.R., durante 10 días. Posteriormente, una vez se observó un crecimiento notable en el medio de cultivo líquido, se procedió a la inoculación sobre granos de trigo, previamente hidratados 30 minutos, esterilizados en autoclave (J.P. Selecta, España) y depositados en tarros de vidrio con filtro de aire (ratio 10 mL de cultivo líquido:350 g de trigo). Se incubaron a 25 °C, a una H.R. de 85-95% y en presencia de aire durante 10 días. Los granos de trigo recubiertos de micelio fueron deshidratados con aire caliente a 55 °C durante 48 horas empleando un secador de bandejas (Gastroback, Alemania). Los granos deshidratados con crecimiento fúngico se molieron en un molinillo (BlendJet, EE.UU) obteniéndose un polvo homogéneo que se almacenó en un frigorífico (Whirlpool, EE.UU.) bajo condiciones de refrigeración (4 °C).

Finalmente, se procedió a la inoculación de la mezcla en polvo de micelio con grano de trigo sobre la paja de arroz pretratada, empleada como sustrato final y depositada en moldes de silicona de dimensiones rectangulares (11,6 x 3 x 2 cm), requeridas para las posteriores pruebas de caracterización, a excepción de las muestras empleadas para la determinación de la permeabilidad al vapor de agua, que se incubaron en placas Petri de forma

circular (9 cm de diámetro). El pretratamiento de la paja de arroz consistió en cortar (fragmentos de 0,5-1 cm), hidratar durante 24 horas y esterilizar el material húmedo obtenido en autoclave. La cantidad de inóculo utilizado fue de un 10% sobre el sustrato final hidratado y se repartió de forma estratificada en los moldes, los cuales se cubrieron con film de plástico perforado. La incubación se realizó durante 17 días a 25 °C y 85-95% de H.R. Para conseguir un crecimiento más homogéneo en ambas caras, los biocomposites rectangulares se voltearon a los 10 días de incubación.

Esta metodología se desarrolló siguiendo la línea de otras investigaciones (Aiduang *et al.*, 2022; Appels *et al.*, 2019, Girometta *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2022), con modificaciones.

2.2.2. OBTENCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS BIOCOMPOSITES TIPO ESPUMA Y TERMOCOMPRESIÓN

Finalizado el crecimiento y conseguida la colonización homogénea, los biocomposites fueron secados a 70 °C en un secador de bandejas (Gastroback, Alemania) hasta alcanzar peso constante, para lograr la inactivación del crecimiento fúngico y para dar la cohesión final al material. De esta manera, se obtienen los biocomposites tipo espuma.

Para la obtención del material termocomprimido, es necesaria una última operación de prensado tras el secado. Se realizaron varias pruebas preliminares de termocompresión, basándose en estudios previos (Appels *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2022;), empleando una prensa de platos calientes (Labtech Engineering, Tailandia) y variando las condiciones de temperatura y tiempo, hasta conseguir un material homogéneo. Las condiciones seleccionadas fueron: 150 °C en ambas placas, presión atmosférica y 10 minutos de tratamiento, seguido de 3 minutos de enfriamiento.

Las muestras empleadas para el análisis de humedad y actividad de agua no se acondicionaron. Las muestras empleadas para el análisis de capacidad de absorción de agua y propiedades térmicas se acondicionaron a $0 \pm 1\%$ H.R. y 25 ± 1 °C con una solución sobresaturada de P_2O_5 . El resto de las muestras se acondicionaron a $53 \pm 1\%$ de H.R. y 25 ± 1 °C con una solución sobresaturada de $Mg(NO_3)_2$.

2.3. Caracterización del rendimiento del crecimiento de los hongos

Para los cálculos del rendimiento se tomaron los datos de los gramos de paja de arroz en cada molde, de los gramos de biocomposites obtenidos, de la humedad de la paja de arroz y de la humedad de los biocomposites tras la etapa de incubación, con el objetivo de conocer la ratio gramos de biocomposite obtenidos / gramos de paja de arroz empleados. El rendimiento se calculó por triplicado como la cantidad (gramos) de biocomposite obtenido en relación con la cantidad (gramos) de sustrato empleado (paja de arroz), considerando tanto los pesos en húmedo como en seco.

2.4. Test microbiológico de inactivación del crecimiento del hongo

Para realizar el test microbiológico y asegurar que el tratamiento de secado es eficaz para lograr la inactivación del crecimiento del hongo, los biocomposites tipo espuma, una vez secados, se almacenaron durante 5 días en un ambiente ideal para favorecer su crecimiento. Este ambiente ideal consistió en utilizar granos de trigo hidratados como medio de cultivo, y una atmósfera de 85-95 % de H.R. y 25 °C de temperatura. Esta prueba se realizó por triplicado.

2.5. Caracterización de los biocomposites como material de envasado

2.5.1 CONTENIDO EN AGUA Y ACTIVIDAD DE AGUA

El contenido en agua de los biocomposites recién formados, tras la finalización de la incubación, y de los biocomposites finales, tras secado (tipo espuma y tipo termocomprimido), se obtuvo, por triplicado, por gravimetría mediante secado de aproximadamente 1 g en estufa a vacío a 70 °C \pm 1 °C (J.P.Selecta, España), hasta peso constante (Sartorius, Alemania; \pm 0,00001 g).

La actividad de agua (a_w) de las muestras se midió a 25 °C por triplicado para cada tipo de biocomposite, empleando un higrómetro de punto de rocío, (Lab-Ferrer, España) calibrado con una solución saturada de acetato de potasio ($a_w= 0,22$).

Estos parámetros se midieron también por triplicado en los biocomposites acondicionados a 53% de H.R., para verificar que la estabilización fue adecuada.

2.5.2 DENSIDAD APARENTE, DIMENSIONES, MORFOLOGÍA, CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA E INCREMENTO DE VOLUMEN

Para determinar la densidad aparente (Bruscatto *et al.*, 2019), se pesaron las muestras de cada tipo de biocomposite en una balanza analítica (Sartorius, Alemania; \pm 0,00001) y se empleó un pie de rey (Fervi, Italia) para medir las dimensiones y calcular su volumen, teniendo en cuenta la forma geométrica resultante (rectangular). Las determinaciones se hicieron en la totalidad de las muestras del lote de biocomposites.

La morfología de los biocomposites se analizó de manera visual (Appels *et al.*, 2019).

Para la determinación de la capacidad de absorción de agua se siguieron las directrices de la norma ASTM D1037-12 (2020), con algunas modificaciones. Las muestras de cada tipo de biocomposite fueron sumergidas en agua destilada en una relación 1:100 a 23 \pm 2 °C y se fueron pesando periódicamente en una balanza analítica (Sartorius, Alemania; \pm 0,00001) durante 96 horas. La capacidad de absorción de agua (%), fue determinada, por triplicado, a partir de la diferencia de peso entre las muestras hidratadas a las 96 horas y las muestras iniciales (Sun *et al.*, 2022).

De forma paralela, junto con cada medida de incremento de peso se determinó el incremento de volumen (%), empleando un pie de rey (Fervi, Italia) para medir las dimensiones, a partir de la diferencia de volumen entre las muestras hidratadas a las 96 horas y las muestras iniciales (Aiduang *et al*, 2022). Las determinaciones se hicieron por triplicado para cada biocomposite.

2.5.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

El espesor de las muestras empleadas para realizar los ensayos mecánicos fue previamente determinado utilizando un pie de rey (Fervi, Italia).

2.5.3.1. Test de flexión interna.

Para realizar este ensayo, se siguieron las indicaciones de la norma ISO 178:2020. Se realizaron 10 repeticiones de cada tipo de biocomposite (109,59 x 28,30 x 15,90 cm fueron las dimensiones de los tipo espuma y 110,87 x 32,69 x 1,32 cm para los termocomprimidos), utilizando una prensa mecánica universal (Stable Micro System, TA-XT plus, Inglaterra). Las muestras se colocaron entre dos topes (sonda de flexión en tres puntos, HDP/3PB) separados por 51 y 32 mm (para las muestras tipo espuma y las termocomprimidas, respectivamente) y se programó un ensayo de flexión a una velocidad de 2 mm/minuto y 100 % de deformación para las muestras tipo espuma, y 200 % para las termocomprimidas. A partir de los datos fuerza-distancia obtenidos del ensayo, se calcularon las curvas esfuerzo-deformación (norma ISO 178:2020) y se obtuvieron los parámetros de esfuerzo de flexión y la deformación de flexión máximos, junto con el módulo flexión, relacionado con la rigidez de la muestra.

2.5.3.2. Test de resistencia a la tracción.

Para realizar este ensayo, se siguieron las directrices de la norma ASTM D 882-18. Se realizaron 10 repeticiones de cada tipo de biocomposite (109,59 x 28,30 x 15,90 cm fueron las dimensiones de los tipo espuma y 110,87 x 32,69 x 1,32 cm para los termocomprimidos), utilizando la misma prensa mecánica universal señalada para el ensayo de flexión interna. Las muestras se colocaron entre las pinzas (mordazas A/TG) y durante el ensayo se ejerció una velocidad de elongación de 12,5 mm/minuto hasta la ruptura del material, para lo cual se necesitó aplicar un 30% de deformación para las tipo espuma y un 10 % para las termocomprimidas. Las curvas fuerza-distancia obtenidas en el ensayo de tracción mecánica se transformaron en curvas esfuerzo-deformación, mediante ecuaciones definidas en la norma, con el objetivo de conocer el par esfuerzo de tracción y deformación máximos, junto con el módulo de elasticidad.

2.5.4 PROPIEDADES TÉRMICAS

El comportamiento de degradación térmica de los biocomposites se caracterizó mediante análisis termogravimétrico (TGA 1 STAR System, Mettler Toledo, España).

El análisis se realizó por duplicado con cada uno de los componentes básicos del biocomposite tipo espuma por separado (micelio, paja de arroz y mezcla). Para ello, unos 3-4 mg de cada muestra se introdujeron en un crisol de aluminio y se sometieron a un calentamiento desde 25 a 700 °C, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/minuto, bajo una corriente de nitrógeno de 10 mL/minuto.

2.5.5 PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) se midió por duplicado en los biocomposites termocomprimidos de forma circular, a los que se les midió previamente su espesor medio, ya que en los tipo espuma no fue posible. Se utilizó un método gravimétrico, usando una modificación del método ATSM E96-95 (1995) a 25 ± 1 °C y un gradiente de H.R. de $53-100 \pm 2\%$. Para ello, los biocomposites se colocaron en copas de permeabilidad Payne de 6 cm de diámetro (Elcometer, Bélgica), a las que se les colocó en la parte inferior 30 mL de agua destilada (100% H.R.), y se sellaron haciendo uso de una junta de goma, anilla metálica y pinzas de cierre. El canto de los discos de biocomposites se selló con vaselina para asegurar que la transferencia de materia tuviera únicamente lugar por la superficie circular. Cada copa se introdujo en un desecador con una disolución sobresaturada de $Mg(NO_3)_2$ ($53 \pm 2\%$ de H.R.) a 25 °C y con un ventilador en la parte superior para reducir la resistencia a la transferencia de vapor de agua. Las copas se pesaron periódicamente a intervalos de 1 hora durante 2 días. A partir de ese momento se pesaron cada 2 horas durante 48 horas más. A partir de la gráfica de variación de peso en función del tiempo, se obtuvo el valor de la pendiente, el cual permite obtener la velocidad de transmisión de vapor de agua, valor necesario para la estimación de la permeabilidad al vapor de agua, calculada usando las ecuaciones descritas por Gennadios *et al.* (1994).

2.6. Análisis estadístico

El tratamiento estadístico de los resultados se realizó mediante un análisis de la varianza (ANOVA) utilizando el software Statgraphics Centurión XVIII (Statgraphics Technologies, EE.UU), para un nivel de confianza del 95%. Se utilizó el método LSD (Método de la Mínima Diferencia Significativa) para el análisis de resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayos preliminares y rendimiento

Las condiciones descritas en el apartado 2.2.1 para la obtención del biocomposite final fueron seleccionadas tras realizar dos pruebas preliminares en las que se fueron modificando algunos aspectos en la producción del biocomposite, con el fin de obtener un material con el sustrato (paja de arroz) completamente recubierto de micelio, teniendo en cuenta los resultados de estudios previos (Aiduang *et al.*, 2022; Appels *et al.*, 2019; Bruscato *et al.*, 2019): materiales homogéneos, recubiertos en su totalidad por micelio, resistentes mecánicamente, ligeros y sin signos de contaminación. Por otra

parte, los diferentes lotes obtenidos en estas pruebas iniciales se utilizaron para poner a punto las metodologías relativas a su caracterización. En la Tabla 1 se han resumido las variaciones de cada prueba con respecto a las empleadas finalmente para la obtención del biocomposite, junto con el resultado a mejorar en cada una de ellas.

TABLA 1. Principales puntos de diferenciación en el proceso de producción del biocomposite, resultados a mejorar en cada uno de las pruebas y rendimientos obtenidos en base húmeda (Rh) y base seca (Rs).

Lote	Modificaciones	Resultados a mejorar	Rh (%)	Rs (%)
1	Inoculación sobre el sustrato final en los moldes sólo de manera superficial, en la capa superior Pequeña perforación en los films plásticos Tiempo de incubación inferior (7 días)	Crecimiento micelar muy incompleto, base inferior sin crecimiento	79 ± 3	103 ± 2
2	Inoculación más homogénea en bolsas con el sustrato definitivo y posterior trasvase a los moldes Mayor número de perforaciones en la parte inferior de los moldes y en los films plásticos, para facilitar un mayor acceso de oxígeno Volteo de los moldes tras 10 días de inoculación Tiempo de incubación superior (20 días)	Crecimiento micelar mayor pero aún incompleto, tanto en la parte superior como inferior	69 ± 3	82 ± 7
3	Biocomposite final Inoculación estratificada en los moldes Menor número de perforaciones en los films plásticos Volteo de los moldes tras 10 días de inoculación Tiempo de incubación intermedio (17 días)	Crecimiento homogéneo en ambas caras, pero necesidad de una posible optimización del tiempo de incubación y del uso de moldes de diferente material	97 ± 7	86 ± 2

En la Tabla 1 también se muestran los valores de rendimiento de los tres lotes de biocomposites desarrollados, que oscilaron entre 69-97 % en húmedo y 82-103 % en seco. Las diferencias encontradas en los valores de Rh están relacionadas con la cantidad de agua que se evapora en la etapa de incubación. Por otro lado, las diferencias encontradas en el valor de Rs pueden deberse a la diferente cantidad de sustrato usada entre lotes.

Por tanto, las condiciones optimizadas de crecimiento micelar del hongo se dieron según lo descrito en el lote 3 y se utilizaron para la obtención de los biocomposites definitivos, sobre los que se realizaron los análisis de caracterización posteriores. Como precaución general en la producción del biocomposite, se recomienda un control periódico y frecuente, con el objetivo

de poder actuar ante posibles contaminaciones o ralentizaciones del crecimiento, e intentar evitar en la medida de lo posible el uso de moldes de silicona u otros materiales plásticos no transpirables, que parecen haber dificultado el crecimiento fúngico. La metodología final desarrollada sigue la línea otras investigaciones (Aiduang *et al.*, 2022; Appels *et al.*, 2019, Girometta *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2022).

3.2 Morfología

Tal y como se puede observar en la Figura 1, los biocomposites presentaron una estructura tridimensional semejante a una red, donde se entrelaza el micelio fúngico y la paja de arroz. Además, en el caso del material tipo espuma, se observan huecos vacíos en el interior de la estructura, en coherencia con otros estudios (Aiduang *et al.*, 2022; Appels *et al.*, 2019; Jose *et al.*, 2021). Para los biocomposites termocomprimidos, se observa una disminución notable del volumen y, en consecuencia, una modificación de su estructura tridimensional porosa, además de la generación de zonas de coloración tostada, fruto del sometimiento de la paja de arroz a altas temperaturas.

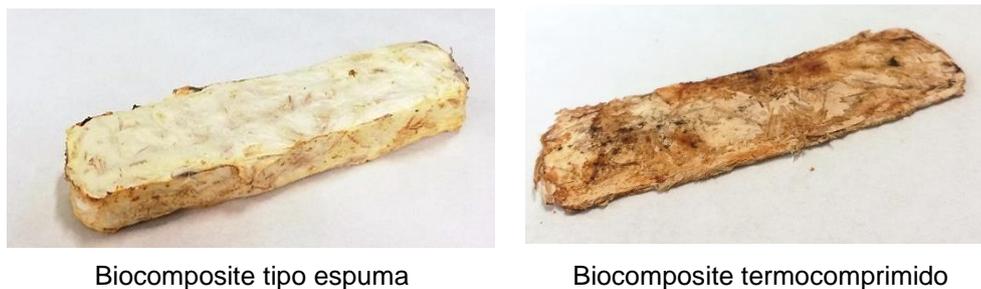


FIGURA 1. Fotografías de los biocomposites a base de micelio obtenidos.

3.3 Test microbiológico de inactivación del crecimiento del hongo

La realización del test microbiológico sirvió para confirmar que el tratamiento de secado aplicado fue suficiente para inactivar el crecimiento del micelio fúngico, evitándose así la formación de micelios secundarios y la formación de primordios que darían posteriormente lugar a un hongo maduro con capacidad de esporular y reproducirse. Así, tras la incubación del biocomposite en condiciones ideales de nutrientes durante 5 días, no se observó crecimiento micelar. Estos resultados concuerdan con lo obtenido por otros autores, que concluyen que el tratamiento de secado es adecuado para lograr una inactivación del crecimiento fúngico, evitando posteriores desarrollos y modificaciones del envase (Alemu *et al.*, 2022; Appels *et al.*, 2019). Además, la especie *Ganoderma resinaceum* está considerada como no patógena, llegando a emplearse en usos medicinales (Mawar *et al.*, 2020).

3.4 Pruebas de caracterización

3.4.1 CONTENIDO EN AGUA Y ACTIVIDAD DE AGUA

El contenido en agua de los biocomposites recién formados (tipo espuma), previamente a su secado fue de $76,33 \pm 1,17$ g de agua /100 g de producto. Este valor es similar a los obtenidos en otros trabajos (Aiduang *et al.*, 2022; Alemu *et al.*, 2022) donde se observaron contenidos de humedad de los biocomposites de entorno a un 60-80 %, dependiendo de la especie y sustrato empleados.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de los valores de actividad de agua (a_w) y contenido en agua (x_w) de ambos tipos de biocomposite, una vez secados, antes y después de equilibrarlos a una humedad relativa del 53%.

TABLA 2. Valores medios (\pm desviación estándar) de la actividad de agua (a_w) y contenido en agua (x_w) para los dos tipos de biocomposite, antes y después de ser equilibrados a una humedad relativa del 53%.

	Espuma		Termocomprimido	
	No estabilizado	Estabilizado	No estabilizado	Estabilizado
a_w	$0,43 \pm 0,02^a$	$0,54 \pm 0,01^A$	$0,314 \pm 0,007^b$	$0,513 \pm 0,003^B$
x_w (%)	$3,2 \pm 0,5^a$	$5,46 \pm 0,16^A$	$2,26 \pm 0,06^b$	$4,53 \pm 0,16^B$

Diferentes letras en superíndice dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre biocomposites ($p < 0,05$), (a-b) no equilibrados, (A-B) equilibrados.

A la vista de estos resultados, se puede concluir que el contenido en agua y a_w de ambos tipos de biocomposite son muy bajos, lo cual puede deberse al hecho de que se someten a un proceso de calentamiento, a la estructura porosa, que facilita la salida del agua, y al bajo contenido en agua inicial de la paja de arroz (Yang *et al.*, 2021). No se han hallado estudios previos para poder comparar los valores de a_w y contenido en agua de los biocomposites finales, sin embargo, Girometta *et al.* (2019) y Yang *et al.* (2021) señalan que contenidos de humedad residuales del 10 al 15 % están considerados como aceptables.

Se puede observar que el proceso de termocompresión redujo significativamente ($p < 0,05$) tanto el contenido en humedad como la a_w de las muestras debido a la aplicación de altas temperaturas y a la modificación de la estructura de las muestras. Resultados similares han sido encontrados por otros autores (Appels *et al.* 2019; Yang *et al.* 2021). Estas diferencias se mantuvieron en las muestras una vez equilibradas al 53% de H.R.

3.4.2 DENSIDAD APARENTE, DIMENSIONES, MORFOLOGÍA, CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA E INCREMENTO DE VOLUMEN

En la Tabla 3 se muestran los resultados de las dimensiones y los valores de densidad y volumen de ambos tipos de biocomposite, junto con la capacidad de absorción de agua y el incremento de volumen experimentado tras 96 horas de hidratación.

TABLA 3. Valores medios (\pm desviación estándar) de dimensiones, volumen, densidad, capacidad de absorción de agua e incremento de volumen tras la hidratación para los 2 tipos de biocomposite.

	Espuma	Termocomprimido
Largo (mm)	109,586 \pm 1,114 ^b	110,9 \pm 1,8 ^a
Ancho (mm)	28 \pm 2 ^b	32,7 \pm 1,2 ^a
Espesor (mm)	15,9 \pm 0,6 ^a	1,3 \pm 0,4 ^b
Volumen (cm³)	49 \pm 4 ^a	4,8 \pm 1,3 ^b
Densidad (g/cm³)	0,08 \pm 0,01 ^b	0,88 \pm 0,13 ^a
Capacidad de absorción de agua (%)	433 \pm 3 ^a	290 \pm 14 ^b
Incremento de volumen (%)	4,14 \pm 0,07 ^b	149 \pm 16 ^a

Diferentes letras en superíndice (a - b) dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre biocomposites ($p < 0,05$).

Los resultados obtenidos evidencian que ambos tipos de biocomposite son materiales poco densos, especialmente el tipo espuma, debido a su naturaleza porosa. Esta característica podría suponer una ventaja desde el punto de vista de su aplicación como materiales de envasado de alimentos que requieran transporte y almacenamiento.

Los valores obtenidos son similares a los de trabajos previos (Aiduang *et al.*, 2022), con resultados del orden de 0,20 g/cm³ para biocomposites tipo espuma obtenidos a partir de la misma familia de hongo filamentoso y el mismo sustrato. Por su parte, Bruscato *et al.* (2019), que trabajaron con una mezcla de serrín y granos de trigo y con la especie *Pycnoporus sanguineus*, llegaron a valores de densidad más elevados, alrededor de 0,30 g/cm³. Appels *et al.* (2019), trabajando con paja de colza y *Trametes multicolor* obtuvieron valores de 0,1 g/cm³. Este hecho demuestra que la densidad depende notablemente del tipo de sustrato y especie empleada en la creación del biocomposite. Los resultados de densidad obtenidos en el biocomposite tipo espuma son similares a los encontrados en otros materiales plásticos empleados en el envasado de alimentos como el poliestireno (0,011-0,05 g/cm³).

El proceso de termocompresión redujo el volumen en un 90% y, en consecuencia, produjo un aumento de densidad en un 10%, lo que justifica las diferencias significativas ($p < 0,05$) observadas en el volumen y la densidad aparente entre ambos tipos de biocomposite. Valores similares han sido encontrados en otros estudios, como el de Sun *et al.* (2022) o Appels *et al.* (2019), que obtuvieron valores aproximados de densidad para biocomposites termocomprimidos de 0,60 y 0,40 g/cm³, respectivamente.

Los dos tipos de biocomposite presentaron una elevada capacidad de absorción de agua, especialmente los de tipo espuma. Esta absorción de agua se tradujo en un incremento del volumen, que fue significativamente mayor ($p < 0,05$) en los materiales termocomprimidos. Los valores encontrados de absorción de agua para el material tipo espuma concuerdan con los obtenidos por otros autores (entre 200-500%), dependiendo del tipo de sustrato y hongo utilizado (Aiduag *et al.*, 2022; Appels *et al.*, 2019). Esto se atribuye al carácter hidrofílico de los componentes celulósicos de la paja de arroz y del micelio

fúngico (Aiduang *et al.*, 2022). Esta característica, si no se puede mejorar, supone una desventaja desde el punto de vista de su aplicación como material de envasado para alimentos húmedos, respecto a otros materiales convencionales como poliestireno, polipropileno, poliamidas y otros (Aiduang *et al.*, 2022).

El proceso de termocompresión disminuyó significativamente ($p < 0,05$) la capacidad de absorción de agua del material, que aumentó su volumen hasta un 25% del volumen inicial antes de la compresión.

3.4.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las Figuras 2 y 3 muestran el comportamiento mecánico de los materiales tipo espuma y termocomprimidos durante el ensayo de flexión y tracción. Como se puede observar, la termocompresión dio lugar a un material más resistente y rígido pero frágil, ya que se rompe a deformaciones relativamente bajas.

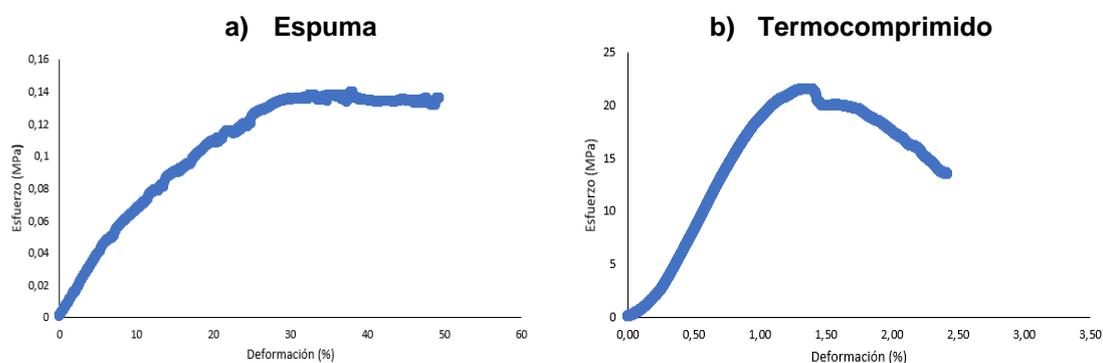


FIGURA 2. Curvas típicas obtenidas en los ensayos mecánicos de flexión de los biocomposites tipo espuma y termocomprimidos.

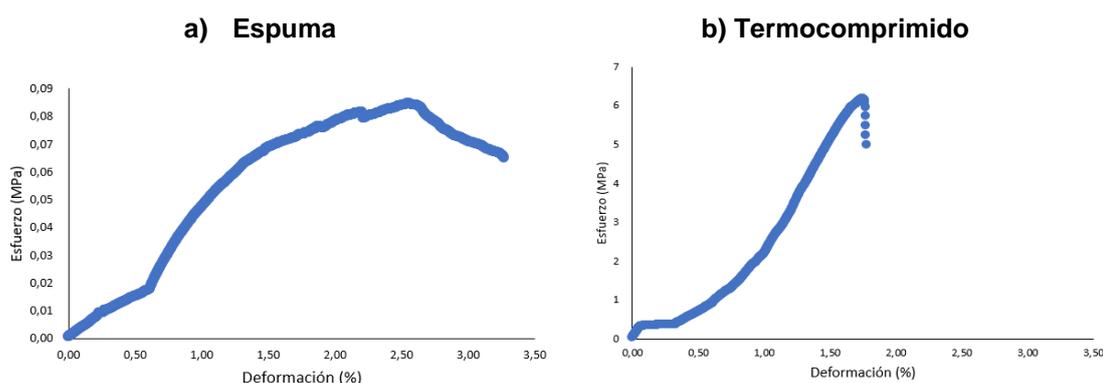


FIGURA 3. Curvas típicas obtenidas en los ensayos mecánicos de tracción de los biocomposites tipo espuma y termocomprimidos.

Los valores de los parámetros mecánicos obtenidos a partir de los ensayos de flexión y de resistencia a la tracción se muestran en la Tabla 4. La respuesta mecánica de los biocomposites a base de micelio fúngico es fruto de la estructura tridimensional y cohesionada del micelio con la paja de arroz, de su bajo contenido en agua y del elevado contenido en celulosa y lignina del sustrato, que junto con la quitina del micelio, proporcionan rigidez (Bruscato

et al., 2019; Yang *et al.*, 2021). Esta característica podría suponer una ventaja desde el punto de vista de su aplicación como materiales de envasado de alimentos que requieran de resistencia, transporte o soporte de peso.

TABLA 4: Valores medios (\pm desviación estándar) de: (i) ensayo de flexión interna: deformación y esfuerzo máximos (ϵ_f , σ_f) y módulo de flexión (MF); (ii) ensayo de resistencia a la tracción: tensión y deformación en el punto de ruptura y módulo de elasticidad (ME) de los dos tipos de biocomposite.

Ensayo	Parámetro mecánico	Espuma	Termocomprimido
Flexión	σ_f (MPa)	0,15 \pm 0,03 ^b	24,6 \pm 1,9 ^a
	ϵ_f (%)	43 \pm 7 ^a	1,3 \pm 0,3 ^b
	MF (MPa)	0,007 \pm 0,003 ^b	18 \pm 8 ^a
Resistencia a la tracción	σ (MPa)	0,088 \pm 0,014 ^b	8 \pm 2 ^a
	ϵ (%)	2,5 \pm 0,7 ^a	1,4 \pm 0,8 ^b
	ME (MPa)	0,032 \pm 0,008 ^b	5 \pm 2 ^a

Diferentes letras en superíndice (a - b) dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre biocomposites ($p < 0,05$).

Los valores del esfuerzo de flexión de la espuma obtenidos fueron similares a los observados por Aiduang *et al.* (2022) (entre 0,10-0,15 MPa) trabajando con la misma familia fúngica y sustrato y a los encontrados para envases de poliestireno (0,07-0,7 MPa) (Aiduang *et al.*, 2022). Por otro lado, en el mismo estudio se obtuvo una resistencia a la tracción superior (0,37-0,46 MPa) que el obtenido en este trabajo, seguramente por la diferente geometría, cantidad de sustrato y espesor de las muestras utilizadas en el ensayo, entre otros factores, y también son superiores los valores encontrados para envases de poliestireno (0,15-0,7 MPa) (Aiduang *et al.*, 2022). Otros autores (Appels *et al.*, 2019; López *et al.*, 2015) revelan valores algo diferentes, si bien trabajaron con diferentes especies y sustratos.

Las muestras termocomprimidas presentaron una mayor resistencia mecánica a la tracción y a la flexión (mayores valores del esfuerzo), mayor rigidez (mayores valores de los módulos de flexión y de elasticidad) y menos deformables que los tipo espuma, siendo estas diferencias significativas ($p < 0,05$). Esto se debe a la compactación del material durante su procesado, que contribuye a modificaciones en la conformación y orientación del micelio, proporcionando una mayor rigidez en el biocomposite (Yang *et al.*, 2021; Appels *et al.*, 2019). En general, los valores de esfuerzo máximo del test de flexión fueron mayores que los del ensayo de tracción, en ambos tipos de biocomposite, ya que al realizar el ensayo de flexión sólo se somete a tracción una fracción del volumen de la muestra (Appels *et al.*, 2019).

3.4.5 PROPIEDADES TÉRMICAS

En la Figura 4 y la Tabla 5 se muestran los resultados del TGA para el micelio, la paja de arroz y biocomposite tipo espuma, respectivamente, donde se obtuvo la temperatura inicial (Tonset), la temperatura a la que se produjo la máxima tasa de degradación (Tpeak) y el porcentaje de pérdida de masa en cada evento térmico identificado.

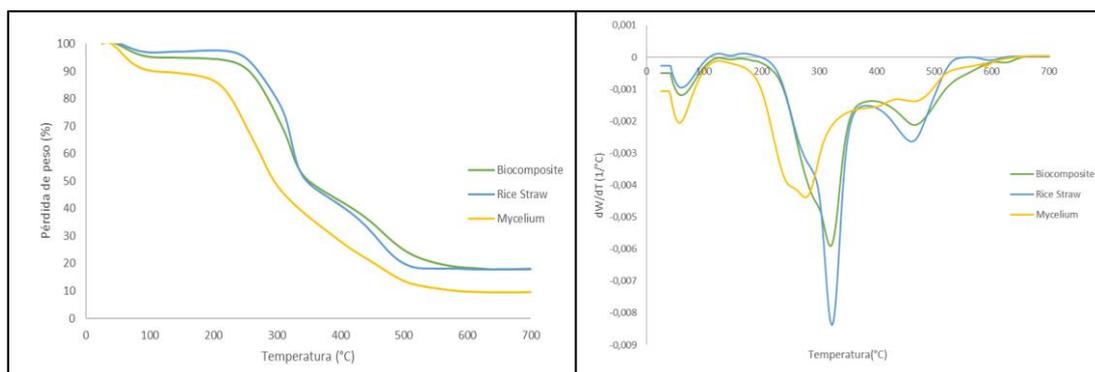


FIGURA 4. Gráfica de pérdida de peso en función de la temperatura de calentamiento del ensayo TGA (izquierda) y DTGA (derecha), para el micelio, paja de arroz y biocomposite.

TABLA 5. Valores medios (\pm desviación estándar) de las temperaturas de los eventos térmicos del ensayo TGA, junto con la pérdida de masa, para el micelio, paja de arroz y biocomposite.

1º Evento	Pérdida de agua				Pérdida de masa (%)	
	TP1 onset (°C)	TP1 peak (°C)	TP1 endset (°C)			
Micelio	38,6 \pm 1,8 ^a	62,6 \pm 1,3 ^a	97 \pm 9 ^a		9 \pm 1,8 ^a	
Paja de arroz	39,4 \pm 0,7 ^a	61 \pm 10 ^a	101 \pm 13 ^a		4,2 \pm 0,7 ^b	
Biocomposite	39,3 \pm 0,5 ^a	63 \pm 5 ^a	101 \pm 8 ^a		5,4 \pm 0,3 ^{ab}	
2º evento	Celulosa / Hemicelulosa/ Beta-Glucanos / Quitina /Lignina					
	TP2 onset (°C)	TP2.1 peak (°C)	TP2.2 peak (°C)	TP2.3 peak (°C)	TP2 endset (°C)	Pérdida de masa (%)
Micelio	152 \pm 2 ^c	280,5 \pm 0,5 ^b	471 \pm 1,4 ^a	561	632 \pm 4 ^a	80 \pm 5 ^a
Paja de arroz	178 \pm 5 ^a	233 \pm 2 ^a	460,6 \pm 0,4 ^b		553 \pm 3 ^b	79,2 \pm 0,5 ^a
Biocomposite	166 \pm 3 ^b	320,8 \pm 1,13 ^a	469 \pm 3,5 ^a		587 \pm 21 ^b	76 \pm 0,6 ^a
3º evento	Metabolitos secundarios				Pérdida de masa (%)	Masa residual (%)
	TP3 onset (°C)	TP3 peak (°C)	TP3 endset (°C)			
Micelio						10 \pm 11 ^a
Paja de arroz	568,5 \pm 1,4 ^a	600,4 \pm 0,6 ^b	620 \pm 8 ^a		0,3 \pm 0,3 ^a	18 \pm 3 ^a
Biocomposite	588 \pm 22 ^a	620 \pm 5 ^a	623 \pm 6 ^a		0,5 \pm 0,3 ^a	18 \pm 0,7 ^a

Diferentes letras en superíndice (a - c) dentro de la misma columna indican diferencias significativas entre muestras ($p < 0,05$).

Como puede verse en la Figura 4, la curva TGA del material de micelio exhibió cuatro eventos térmicos, aunque tres de ellos aparecieron juntos y no fue posible distinguir su temperatura inicial y final. Por lo tanto, se han agrupado en el mismo evento térmico. Así, el primer evento ocurrió en el intervalo de temperaturas de 38-97 °C, asociado a la liberación de agua ligada, que aún puede estar presente incluso en muestras secas. Esta agua ligada representó alrededor del 9% del peso de la muestra. El segundo evento tuvo lugar entre 152-632 °C, donde varios eventos aparecieron superpuestos y se correspondió con la mayor pérdida de peso de la muestra, en torno al 80 %, en línea con lo obtenido por otros autores (Sun *et al.*, 2022). En este periodo, las temperaturas a las que la tasa de degradación fue máxima fueron 280, 471 y 561 °C. Esta etapa coincide con el patrón de degradación típico observado para cadenas laterales de polisacáridos, incluyendo alfa-glucanos, ya sea individualmente o como parte de glicoproteínas, beta-glucanos, quitina-glucanos y quitina pura (de menor a mayor resistencia térmica del

compuesto), que son los componentes principales del micelio (Yang *et al.*, 2021).

En la paja de arroz se observaron tres eventos térmicos principales, como se puede ver en la Figura 4. El primer evento térmico ocurrió en el rango de temperaturas de 40-101 °C, de nuevo asociado a la pérdida de moléculas de agua unidas a las fracciones celulósicas y a la pérdida de volátiles de pequeño peso molecular (representando alrededor del 4,2% del peso). El segundo evento correspondió a la degradación térmica de los componentes lignocelulósicos (entre 178-461 °C), específicamente celulosa y hemicelulosa, tal y como ha sido observado por Freitas *et al.* (2022), al trabajar con fibras celulósicas de paja de arroz. En este segundo periodo, la temperatura a la que se dio la máxima degradación fue de 322 °C. El tercer evento térmico observado, con un máximo de degradación a 461 °C, se atribuye a la degradación térmica de la lignina y a los productos resultantes de la fragmentación de su estructura orgánica (Freitas *et al.*, 2022).

La estructura molecular del biocomposite es la combinación de las dos anteriores, donde el componente principal (en peso) es la paja de arroz, afectada en mayor o menor medida por la degradación parcial de la celulosa, hemicelulosa y lignina en el proceso de crecimiento del hongo, que debería aumentar el contenido de betaglucanos y quitina presentes en el material. Por lo tanto, se supone que el comportamiento del biocomposite debería ser intermedio entre ambos materiales, con mayor estabilidad térmica que la materia prima. Así, como se puede observar en la Figura 4, las curvas TGA y DTGA obtenidas para el biocomposite fueron más similares a las obtenidas en la paja cruda, debido al bajo porcentaje en peso de micelio en el material, con tres eventos térmicos principales en concordancia con lo encontrado por otros autores (Jose *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2022). El agua ligada se situó en torno al 5%, valor inferior al encontrado por Bruscato *et al.* (2019), que observaron mayores valores (de hasta un 10%). El segundo evento comenzó y terminó a temperaturas intermedias a las encontradas para la paja de arroz y el micelio. Por tanto, podemos decir que la degradación por el hongo tuvo poca influencia en la estabilidad térmica de las partículas de paja de arroz, aunque aumentó ligeramente su estabilidad térmica. Otros autores que trabajaron con materiales similares han encontrado comportamientos similares (Appeals *et al.*, 2019, Jose *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2022;).

Como conclusión, y comparando la degradación térmica experimentada por el biocomposite con la de otros materiales de envasado de alimentos como el poliestireno (Jose *et al.*, 2021), se puede considerar que estos materiales son altamente estables a la degradación térmica, incluso más que el poliestireno.

3.4.6 PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA

Los valores obtenidos de PVA para los biocomposites termocomprimidos fueron de $1,7 \cdot 10^{-9} \pm 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{día}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, valores típicos de materiales notablemente permeables al vapor de agua. El valor medio de permeabilidad obtenido fue similar al de films hidrofílicos como el almidón y el polivinilalcohol,

y superior al del PHBV, éste con permeabilidades del orden de 10^{-12} . No se han encontrado valores de PVA de este tipo de materiales en la bibliografía.

4. CONCLUSIONES

Los biocomposites a base de micelio parecen ser una prometedora alternativa para su uso como materiales de envasado, dado su carácter biodegradable, su contribución a la economía circular de residuos agroindustriales y a sus interesantes propiedades: baja densidad, elevada resistencia y rigidez y elevada estabilidad térmica. Por otro lado, sería necesario mejorar sus propiedades barrera al vapor de agua y de capacidad de absorción de agua, aspectos claves de cara a su uso como materiales de envasado de alimentos.

La termocompresión del material tipo espuma modificó de forma significativa prácticamente todas las propiedades de los biocomposites, que se volvieron mecánicamente más resistentes y rígidos con propiedades adecuadas para el desarrollo de bandejas, con menor capacidad de absorción de agua y unas propiedades barrera al vapor de agua similares a otros plásticos biodegradables como el almidón o PVA, si bien es cierto que este proceso, dado el tiempo y los equipos requeridos para ello, puede encarecer el proceso productivo, además de causar modificaciones superficiales sobre el material que pueden resultar indeseadas.

Tras el análisis de las propiedades de los dos tipos de biocomposite (espuma y termocomprimidos), y teniendo en cuenta los valores de rendimiento y los problemas encontrados durante el desarrollo de los materiales, sería necesario continuar con esta línea de investigación para avanzar en el desarrollo y aplicación de biocomposites a base de micelio como alternativa al uso de envases plásticos no biodegradables para alimentos, que si bien es prometedora, requiere de un proceso de optimización de la metodología para su escalado a nivel de la industria alimentaria, una regulación dentro del marco legislativo de los materiales en contacto con alimentos y una mejora de sus propiedades, en especial, de su carácter hidrofílico. Desarrollando estas mejoras, y teniendo en cuenta los hallazgos del presente estudio, los biocomposites a base de micelio parecen tener un interesante futuro dentro de los nuevos desarrollos de materiales biodegradables, en el camino de lograr una mayor sostenibilidad ambiental.

5. REFERENCIAS

Aiduang, W.; Kumla, J.; Srinuanpan, S.; Thamjaree, W.; Lumnyong, S. & Suwannarach, N. (2022). "Mechanical, Physical, and Chemical Properties of Mycelium-Based Composites Produced from Various Lignocellulosic Residues and Fungal Species" *Journal of Fungi*, 8, 1125. DOI: 10.3390/jof8111125

American Society for Testing and Materials (2005). Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, (ASTM E96/E96M). https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0096_E0096M-22AE01%7Cen-US

- American Society for Testing and Materials (2018). Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. (ASTMD 882-18). <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD0882-18%7Cen-US>
- American Society for Testing and Materials (2020). Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. (ASTMD 1073-12 2020). <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD1037-12R20%7Cen-US>
- Alemu, D.; Tafesse, M. & Mondal, A.K. (2022). "Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial". *Hindawi International Journal of Biomaterials*, 8401528. DOI: 10.1155/2022/8401528
- Appels, F.; Camere, S.; Montalti, M.; Karana, E.; Jansen, K.; Dijksterhuis, J.; Krijgsheld, P. & Wösten, H. (2019). "Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites". *Materials and Design*, 161, 64-71. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.027
- Asociación Española de Normalización (2020). Plásticos: Determinación de las propiedades de flexión. (UNE-EN ISO 178:2020). <https://www.aenor.com/>
- Bruscato, C.; Malvessi, E.; Brandalise, R.N. & Camassola, M. (2019). "High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust d Sustainable technology for waste reduction". *Journal of Cleaner Production*, 234, 225-232. DOI: /10.1016/j.jclepro.2019.06.150
- Freitas, P.; González-Martínez, C. & Chiralt, A. (2022). "Applying ultrasound-assisted processing to obtain cellulose fibres from rice straw to be used as reinforcing agents". *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 76, 102932. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102932
- Gennadios, A.; Weller, C.L. & Gooding, C.H. (1994). "Measurement Errors in Water Vapor Permeability of Highly Permeable, Hydrophilic Edible Films". *Journal of Food Engineering*, 21, 395-409. DOI: 10.1016/0260-8774(94)90062-0
- Girometta, C.; Picco, A.M.; Baiguera, R.M.; Dondi, D.; Babbini, S.; Cartabia, M.; Pellegrini, M. & Savino, E. (2019). "Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review". *Sustainability*, 11, 281. DOI: 10.3390/su1101028
- Jose, J.; Uvais, K.N.; Sreenadh, S.; Deepak, A.V. & Rejeesh, C.R. (2021). "Investigations into the Development of a Mycelium Biocomposite to Substitute Polystyrene in Packaging Applications". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 2975–2984. DOI: 10.1007/s13369-020-05247-2
- López, J.A.; González, J.; Chacón, X. & Nájera, J.A. (2015). "Assessment of Edible Fungi and Films Bio-Based Material Simulating Expanded Polystyrene". *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 1085-1090. DOI: 10.1080/10426914.2015.1070420
- Mawar, R.; Ram L.; Deepesh & Mathur, T. (2020). Ganoderma. In *Beneficial Microbes in Agro-Ecology*, pp 625-649. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823414-3.00031-9>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Stark, N.M & Matuana, L.M. (2021). "Trends in sustainable biobased packaging materials: a mini review". *Materials Today Sustainability*, 15. DOI: 10.1016/j.mtsust.2021.100084
- Sun, W.; Tajvidi, M.; Howell, C. & Hunt, C.G. (2022). "Insight into mycelium-lignocellulosic bio-composites: Essential factors and properties". *Composites Part A*, 161, 107125. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107125
- Yang, L.; Park, D. & Qin, Z. (2021). "Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review". *Frontiers in Materials*, 8:737377. DOI: 10.3389/fmats.2021.737377

ANEXO I: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.	X			
ODS 3. Salud y bienestar.				X
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.				X
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsables.	X			
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.	X			
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.	X			
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

El presente trabajo presenta una alineación con el ODS N.º 2 “Hambre cero”, ya que sería una forma de reducir las pérdidas de alimentos porque el material estudiado podría utilizarse para la conservación de alimentos, también con el ODS N.º 12 “Producción y consumo responsables” directamente relacionado ya que estamos utilizando un residuo como material para un envase cuya producción es sostenible y responsable. Finalmente, teniendo en cuenta la contaminación causada por el uso de plásticos, su sustitución por materiales biodegradables ayudaría a lograr las metas del ODS N.º 14 “Vida submarina” (en este caso por los microplásticos presentes en el agua) y el ODS N.º 15 “Vida de ecosistemas terrestres” utilizando de forma sostenible los ecosistemas.