



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS
AGRICOLAS Y FORESTALES**

**TESIS
CULTIVO DE SHIITAKE EN RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA
PRODUCCIÓN DE LENTINANO**

Para obtener el grado de:
Ingeniero en Biotecnología

PRESENTA
PATRICIO SEBASTIAN CARRASCO GONZALEZ

Directora
Martha Gayosso Canales

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo., a 11 de agosto del 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ciencias Agrícolas y Forestales

Academic Area of Agricultural and Forestry Sciences

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo., a 11 de agosto de 2026.

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado al pasante de Licenciatura en Ingeniería en Biotecnología, **Patricio Sebastian Carrasco Gonzalez**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **"Cultivo de Shiitake en residuos agroindustriales para la producción de lentinano"**, que después de revisarlo en reunión de comité de tesis, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del comité de tesis:

DIRECTOR	Dra. Martha Gayosso Canales
ASESOR	Dra. Deyanira Ojeda Ramírez
ASESOR	Ing. Quím. Norma Yacelit Trápala Pineda

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Luis González de la Rosa
Coordinador de Ingeniería en Biotecnología

"Amor, Orden y Progreso"



Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago
Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.
Teléfono: 7717172000 Ext. 42073
profe_5566@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

Contenido

I. Introducción.....	7
II. Marco teórico	9
2.1 Propiedades nutraceuticas de los basidiomicetos	9
2.1.1 Propiedades nutraceuticas de hongos comestibles.....	10
2.1.1.1 Actividad antioxidante.....	11
2.1.1.2 Propiedades hipocolesterolémicas	13
2.1.1.3 Efectos antidiabéticos.....	14
2.1.1.4 Vitaminas y minerales.....	15
2.1.1.5 Actividad biológica de polisacáridos y β -glucanos	17
2.2 Biotecnología en la producción de hongos medicinales	17
2.2.1 Técnicas de cultivo controlado en medio sólido	18
2.2.2 Factores para la optimización del cultivo	19
2.3 Efecto de las condiciones de cultivo en la composición nutraceutica en los hongos de la pudrición blanca.....	21
2.3.1 Factores ambientales	21
2.3.2 Tipo de sustrato.....	23
2.3.3 Interacción entre factores ambientales y sustrato	23
2.4 Impacto económico del cultivo de hongos.....	24
2.5 Impacto ambiental del cultivo de hongos	24
2.5.1 Residuos agroindustriales empleados para la formulación de sustratos	25
2.6 <i>Lentinula edodes</i>	27
2.6.1 Generalidades	27
2.6.2 Componentes nutraceuticos	28
2.7 Lentinano	28
2.7.1 Características	29
2.7.2 Composición química	29
2.7.3 Actividad bioquímica.....	30
2.8 Fundamento de la técnica de cuantificación de Lentinano	30
2.9 Hipótesis.....	31
2.10 Objetivo General.....	31
2.11 Objetivos particulares	31

III. Metodología.....	31
3.1 Material biológico y reactivos	31
3.1.1 Aislamiento del micelio de shiitake	32
3.1.2 Preparación del inóculo	32
3.1.3 Preparación del inóculo	32
3.2 Diseño experimental	33
3.3 Cultivo de <i>shiitake</i>	34
3.4 Fructificación, maduración y eficiencia biológica	34
3.5 Extracción y cuantificación de lentinano.....	35
3.5.1 Extracción y purificación de lentinano.....	35
3.5.2 Cuantificación.....	36
3.6 Análisis estadístico de los resultados obtenidos	36
IV. Resultados.....	38
4.1 Aparición de primordios	38
4.2 Eficiencia biológica de 1er y 2do corte de <i>L. edodes</i> cultivado en diferentes sustratos	38
4.3 Contenido de lentinano en cuerpos fructíferos de <i>L. edodes</i> , cultivados en diferentes sustratos	39
V. Discusión de resultados	40
5.1 Colonización del sustrato y formación de primordios	40
5.2 Eficiencia biológica de <i>L. edodes</i> cultivado en diferentes sustratos	41
5.3 Efecto de la formulación del sustrato sobre el contenido de lentinano en carpóforos de Shiitake.....	42
VI. Conclusión	45
VII. Referencias.....	46
VIII. Anexo.....	54

Índice de figuras

Figura 1. Estructura química de la ergotioneína	11
Figura 2. Beneficios de los hongos comestibles.	16
Figura 3. Mejoramiento genético de hongos (Dong et al., 2022).....	20
Figura 4. Factores ambientales para el cultivo de hongos comestibles.	23
Figura 5. Taxonomía y carpóforo de Lentinula edodes (Duque et al., 2015).....	27
Figura 6. Lentinano: β -(1,3) glucanos con cadena lateral β -(1,6), 2 unidades de cadena lateral por cada 5 unidades monoméricas unidas β -(1,3).....	29
Figura 7. Carpóforos jóvenes de Shiitake (izquierda) carpóforos maduros listos para cosechar (centro y derecha).	35
Figura 8. Eficiencia biológica de L. edodes a primer corte y segundo corte en los diferentes sustratos evaluados.	38
Figura 9. Concentración de β -(1-3) -(1-6)-glucanos (Lentinano) en cuerpos fructíferos de L. edodes.	39

Índice de cuadros.

Cuadro 1. Antioxidantes presentes en hongos comestibles.....	12
Cuadro 2. Compuestos hipocolesterolémicos.....	14
Cuadro 3. Comparación entre las características y aplicaciones de fermentación en fase sólida (FFS) y fermentación sumergida (FS) en el cultivo de hongos.	19
Cuadro 4. Requerimientos de temperatura de acuerdo con la etapa del cultivo de L. edodes según la cepa utilizada.	21
Cuadro 5. Diseño experimental para evaluar el efecto de la composición del sustrato en la producción de lentinano y la eficiencia biológica de Shiitake.	33

Resumen

Los hongos medicinales son una fuente rica en compuestos bioactivos con aplicaciones nutraceuticas y farmaceuticas, como el lentinano, un β -glucano con propiedades inmunomoduladoras, antioxidantes y antitumorales, producido por *Lentinula edodes* (shiitake). La producción de este metabolito está relacionada con las condiciones de cultivo, particularmente con la composición química y balance nutricional del sustrato. Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la composición del sustrato en la concentración de lentinano en los cuerpos fructíferos de Shiitake, bajo condiciones de cultivo piloto, utilizando como sustrato base aserrín en mezcla con bagazo de malta (BM), salvado de trigo, cáscara de semilla de calabaza y cáscara haba como suplementos. El cultivo del hongo fue realizado en fermentación en fase sólida bajo condiciones controladas, con tres tratamientos (BM, CSC, CHS) y un control (C); las variables de respuesta evaluadas fueron el tiempo de aparición de primordios, la eficiencia biológica (EB) y la producción de lentinano. Los resultados mostraron que la composición del sustrato afecta significativamente tanto el desarrollo de los cuerpos fructíferos como en la producción de lentinano. Así, la aparición temprana de primordios fue registrada en BM y C a los 36.75 ± 0.50 días, 38.50 ± 0.58 días, respectivamente; también BM alcanzó la EB mayor al 1er corte, 47.69 ± 1.06 %, y al segundo corte con 18.9 ± 0.89 %, y la producción mayor de lentinano, 3.54 ± 0.39 g lentinano/100 g de hongo seco, bajo las condiciones de este estudio. Esto demuestra el potencial del bagazo de malta mezclado con aserrín de encino como alternativa sostenible para la producción de shiitake y lentinano, contribuyendo así al desarrollo de procesos biotecnológicos más eficientes y sustentables en la industria de los hongos medicinales.

I. Introducción

En las últimas décadas, el estudio de los hongos comestibles y medicinales ha adquirido una relevancia significativa en el ámbito de la biotecnología, particularmente por su capacidad para producir compuestos bioactivos con aplicaciones en la salud humana y la industria nutracéutica. Dentro de este grupo, los hongos de la pudrición blanca (HPB) destacan por su capacidad para degradar materiales lignocelulósicos complejos mediante sistemas enzimáticos especializados, lo que les permite no solo desempeñar un papel ecológico fundamental, sino también generar metabolitos secundarios de alto valor, como polisacáridos, β -glucanos y compuestos fenólicos (Hatakka y Hammel, 2010). Estos compuestos han sido ampliamente estudiados por sus propiedades antioxidantes, inmunomoduladoras y antitumorales (Borchers *et al.*, 2008; Habtemariam, 2020), posicionando a los HPB como organismos estratégicos en el desarrollo de productos funcionales y farmacéuticos.

Entre las especies más relevantes se encuentra *Lentinula edodes* (shiitake), uno de los hongos más cultivados a nivel mundial, cuyo valor no solo radica en su importancia alimentaria, sino también en su riqueza en compuestos nutracéuticos. Este hongo contiene proteínas, vitaminas, minerales y, de manera destacada, polisacáridos bioactivos como el lentinano, un β -glucano con estructura β -(1 $\rightarrow$ 3) y ramificaciones β -(1 $\rightarrow$ 6), reconocido por su potente actividad inmunomoduladora (Zhao *et al.*, 2023). El lentinano ha demostrado la capacidad de activar células del sistema inmunológico, incluyendo macrófagos, linfocitos T y células asesinas naturales, promoviendo la producción de citocinas y mejorando la respuesta frente a enfermedades infecciosas y tumorales (Trivedi *et al.*, 2022). Estas propiedades han impulsado su uso como coadyuvante en terapias clínicas, particularmente en países asiáticos, consolidando a *L. edodes* como una fuente biotecnológica de gran interés.

La producción de este tipo de compuestos está estrechamente ligada a las condiciones de cultivo del hongo. En este sentido, la fermentación en fase sólida (FFS) representa una de las estrategias más empleadas para el cultivo de *L. edodes*, debido a su eficiencia en la producción de cuerpos fructíferos y su capacidad para simular condiciones naturales de crecimiento (Yang *et al.*, 2013). Este sistema utiliza principalmente sustratos lignocelulósicos derivados de residuos agroindustriales, tales como aserrín, bagazo y paja, los cuales no solo actúan como fuente de carbono, sino que también permiten la valorización de desechos agrícolas, contribuyendo a modelos de economía circular (Martínez-Carrera, 2010). Sin embargo, la composición química de estos sustratos, particularmente la relación carbono: nitrógeno (C: N) y la disponibilidad de nutrientes, influye directamente en el metabolismo fúngico, afectando tanto el crecimiento micelial como la biosíntesis de metabolitos secundarios (Luis *et al.*, 2017; Mleczek *et al.*, 2020).

Asimismo, factores ambientales como la temperatura, la humedad, el pH y la disponibilidad de oxígeno desempeñan un papel determinante en la eficiencia del cultivo y en la producción de compuestos bioactivos. Se ha demostrado que variaciones en estos parámetros pueden modificar significativamente la actividad enzimática y las rutas metabólicas involucradas en la síntesis de polisacáridos, incluyendo el lentinano (Petre y Petre, 2016; Cheng *et al.*, 2021). De igual manera, el tipo de sustrato utilizado puede alterar la disponibilidad de precursores metabólicos necesarios para la formación de estos compuestos, generando diferencias en su concentración final (Huang *et al.*, 2022).

A pesar de los avances en el estudio de *L. edodes*, aún existen vacíos de conocimiento con relación a la influencia específica de la composición del sustrato sobre la producción de lentinano, especialmente cuando se emplean residuos agroindustriales como materia prima. Si bien se ha documentado que estos residuos pueden ser utilizados como sustratos eficientes, la relación cuantitativa entre su composición química y la biosíntesis de polisacáridos bioactivos no ha sido completamente elucidada. Esta limitación representa una oportunidad para profundizar en el entendimiento de los factores que regulan la producción de lentinano, con el fin de optimizar los sistemas de cultivo desde una perspectiva biotecnológica.

De esta manera, el presente trabajo integra conceptos de biotecnología fúngica, fermentación en fase sólida y análisis de compuestos bioactivos, con el propósito de generar conocimiento que contribuya al diseño de estrategias de producción más eficientes y sostenibles. Además, contribuir al aprovechamiento de residuos agroindustriales como materias primas para procesos biotecnológicos, promoviendo así el desarrollo de sistemas productivos con impacto económico, ambiental y social positivo.

II. Marco teórico

2.1 Propiedades nutraceuticas de los basidiomicetos

Entre los basidiomicetos con propiedades nutraceuticas destacan los hongos de la pudrición blanca (HPB) cuya capacidad para degradar polisacáridos complejos de la madera, como la lignina y la celulosa, mediante la acción de enzimas especializadas como las lacasas y las peroxidasas, ha propiciado su aplicación en procesos industriales y biotecnológicos. Y la presencia de compuestos bioactivos en los HPB ha captado la atención de la comunidad científica por sus beneficios para la salud humana (Hatakka y Hammel, 2010).

Cabe resaltar que los HPB como *Trametes versicolor* (cola de pavo), *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra), *Hericiium erinaceus* (melena de león) y *L. edodes* (shiitake), son ricos en compuestos bioactivos, entre ellos polisacáridos, fenoles, terpenos y antioxidantes. En particular, los β -glucanos son polisacáridos ampliamente estudiados por su capacidad para modular el sistema inmunológico y actuar como agentes antitumorales (Wang *et al.*, 2024) por ejemplo, los extractos de β -glucanos de *T. versicolor* estimulan la producción de células inmunitarias como macrófagos y linfocitos T, mejorando la respuesta inmune frente a infecciones y tumores (Habtemariam, 2020).

Por otro lado, los fenoles y flavonoides presentes en estos hongos actúan como potentes antioxidantes, protegiendo las células contra el estrés oxidativo, un factor clave en el desarrollo de enfermedades crónicas como la diabetes, enfermedades cardiovasculares y el cáncer. *P. ostreatus*, por ejemplo, contiene compuestos fenólicos con una actividad significativa en la reducción de radicales libres (Patel y Goyal, 2011). Las propiedades nutraceuticas de los hongos de la pudrición blanca incluyen efectos hipoglucemiantes, hipocolesterolémicos, inmunomoduladoras y antitumorales.

1. **Efectos hipoglucemiantes:** Extractos de *L. edodes* reducen los niveles de glucosa en sangre mediante la inhibición de enzimas como la α -glucosidasa, responsables de la descomposición de carbohidratos en glucosa (Papoutsis *et al.*, 2021).
2. **Efectos hipocolesterolémicos:** Los HPB contienen esteroides y fibras dietéticas que ayudan a reducir los niveles de colesterol LDL en sangre, previniendo la acumulación de placas en las arterias y promoviendo la salud cardiovascular. La administración de extractos de *P. ostreatus* y *L. edodes* disminuye significativamente los niveles de colesterol total y triglicéridos (Camilleri *et al.* 2025).

3. **Propiedades antitumorales:** Los polisacáridos y terpenoides aislados de hongos como *T. versicolor* y *H. erinaceus* se han utilizado como coadyuvantes en terapias contra el cáncer. El polisacárido K (PSK), un extracto estandarizado de *T. versicolor*, es utilizado en Japón como parte del tratamiento para el cáncer de estómago, mejorando la supervivencia de los pacientes al estimular la actividad de las células asesinas naturales (natural killer cells) (Habtemariam, 2020). Asimismo, el terpenoide erinacina C proveniente de *H. erinaceus* mostró propiedades neuroprotectoras y antitumorales, contribuyendo al tratamiento de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y ciertos tipos de cáncer (Ma *et al.*, 2010)

Las evidencias documentadas muestran que los HPB son una de las fuentes de origen natural más importantes de compuestos bioactivos con acción nutracéutica y potencial farmacológico. Investigaciones previas con especies como *L. edodes*, *T. versicolor*, *P. ostreatus* y *H. erinaceus* demuestran que la presencia de β -glucanos, polisacáridos, compuestos fenólicos, terpenoides y otros metabolitos secundarios les confieren actividades biológicas como inmunomoduladores, antioxidantes, hipoglucemiantes, hipocolesterolémicos, antitumorales y neuroprotectores (Habtemariam, 2020; Ma *et al.*, 2010).

Por lo tanto la actividad biológica de estos HPB trasciende su valor nutricional, ya que sus metabolitos interactúan con diversas rutas metabólicas involucradas en la prevención y el tratamiento complementario de enfermedades crónicas y degenerativas, catalogando a estas especies como hongos medicinales de alto interés biotecnológico, impulsando el desarrollo de nutracéuticos, alimentos funcionales y productos farmacéuticos derivados de sus compuestos bioactivos, así como el incremento de investigaciones orientadas a optimizar su cultivo de estos hongos, la extracción los compuestos bioactivos y su aprovechamiento industrial (Chaturvedi *et al.*, 2018; Valverde *et al.*, 2015).

2.1.1 Propiedades nutracéuticas de hongos comestibles

Los hongos comestibles son organismos heterótrofos con cuerpos fructíferos macroscópicos que contienen fibras dietéticas, ácidos grasos poliinsaturados, proteínas, aminoácidos, cetoácidos, minerales y vitaminas que actúan como nutracéuticos (Rahi y Malik, 2016); y compuestos bioactivos como polisacáridos, β -glucanos, antioxidantes; que muestran actividad inmunomoduladora, antibacteriana, y antiviral (Rathore *et al.*, 2017). Las especies, *Agaricus*, *Auricularia*, *Hericium*, *Cordyceps*, *Ganoderma*, *Grifola*, *Pleurotus*, *Lentinula*, *Lactarius*, *Flammulina*, *Tremella*, *Trametes*, *Russula* y otras han despertado el interés científico como fuentes de nutraceúticos (Kour *et al.*, 2022).

2.1.1.1 Actividad antioxidante

Los hongos comestibles contienen una variedad de antioxidantes que ayudan a proteger el cuerpo humano contra los efectos perjudiciales de los radicales libres que provocan el envejecimiento y el desarrollo de diversas enfermedades crónicas, como cáncer, diabetes, y enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Roupas *et al.*, 2012). Estos compuestos también poseen propiedades antiinflamatorias que contribuyen a la modulación de respuestas inmunes y reducen el riesgo de enfermedades crónicas relacionadas con el estrés oxidativo (Zhao *et al.*, 2023).

La evidencia muestra que el consumo de extractos de *L. edodes* está asociado con una reducción en los biomarcadores de daño oxidativo en humanos, lo que sugiere su potencial como alimento funcional (Mwangi *et al.*, 2022). Entre los antioxidantes asociados a hongos comestibles están: polifenoles, flavonoides, ácidos orgánicos, vitaminas, ergotioneína y glutatión, y enzimas como la superóxido dismutasa (SOD), que son abundantes en *Agaricus bisporus*, *L. edodes* y *G. lucidum* (Kalaras *et al.*, 2017).

Mientras que la ergotioneína (Figura 1) es un aminoácido de bajo peso molecular, soluble en agua que actúa como un antioxidante intracelular para proteger al ADN (Weigand-Heller *et al.*, 2012) y a las células contra el daño oxidativo al eliminar especies reactivas de oxígeno (ROS), el glutatión es un tripéptido que actúa como un antioxidante maestro, involucrado en la regeneración de otros antioxidantes y en la inactivación de radicales libres (Homma y Fujii, 2015). Ambos funcionan como antioxidantes endógenos al incorporarse en el metabolismo celular y promover la actividad de enzimas antioxidantes (Halliwell, 2012).

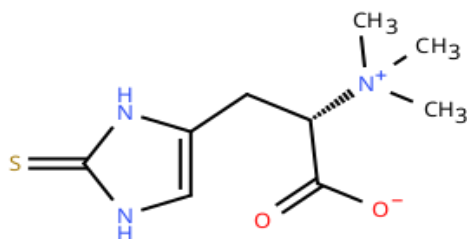
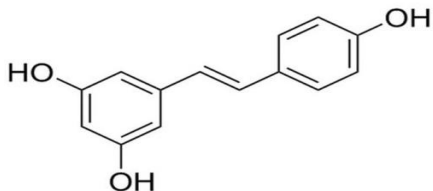
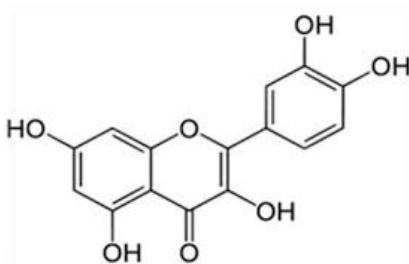
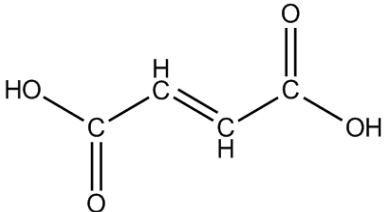
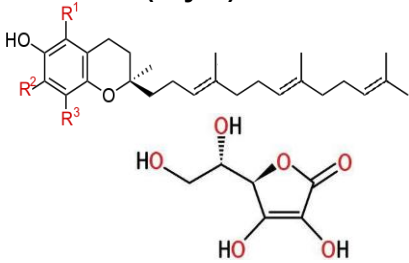


Figura 1. Estructura química de la ergotioneína

Los otros antioxidantes presentes en los hongos comestibles operan mediante diversos mecanismos, algunos compuestos, como los polifenoles, actúan directamente inactivando los radicales libres y reduciendo el daño oxidativo en macromoléculas como el ADN, las proteínas y los lípidos; los ácidos fenólicos y flavonoides potencian la actividad antioxidante. En este contexto, los hongos comestibles poseen un contenido

alto de compuestos antioxidantes (Cuadro 1), que pueden contribuir a la promoción de la salud y la prevención de enfermedades.

Cuadro 1. Antioxidantes presentes en hongos comestibles.

Nombre y Estructura química	Mecanismo antioxidante	Fuente
Polifenoles 	Actúan como donadores de H ⁺ o de e ⁻ neutralizando radicales libres (ROS y RNS). Quelan Fe ⁺² , Cu ⁺² , inhiben la peroxidación lipídica y protegen ADN y proteínas frente al daño oxidativo.	Extractos de <i>L. Edodes</i> y <i>A. bisporus</i> . Su concentración varía según el sustrato y condiciones de cultivo.
Flavonoides 	Alta capacidad reductora; capturan radicales libres mediante transferencia de electrones. Inhiben enzimas prooxidantes y modulan rutas celulares asociadas al estrés oxidativo. También muestran actividad antiinflamatoria.	Fracciones etanólicas de basidiomicetos, incluyendo <i>L. edodes</i> .
Ácidos orgánicos 	Contribuyen al equilibrio redox celular; algunos presentan actividad antioxidante directa por donación de protones. Otros actúan como agentes quelantes de metales y reguladores del pH, favoreciendo la estabilidad metabólica.	Cuerpos fructíferos y micelio de <i>L. edodes</i> y otras especies comestibles. Su perfil varía según la fase de crecimiento y composición del sustrato.
Vitaminas (C y E) 	La vitamina C actúa como antioxidante hidrosoluble donando e ⁻ y regenerando otros antioxidantes. La vitamina E protege lípidos de membrana frente a la peroxidación lipídica. Ambas participan en la red antioxidante celular.	Diversas especies de hongos comestibles, como <i>L. edodes</i> y <i>A. bisporus</i> , en concentraciones variables dependiendo del sustrato y condiciones ambientales.

Adaptado de Beelman *et al.*, 2022.

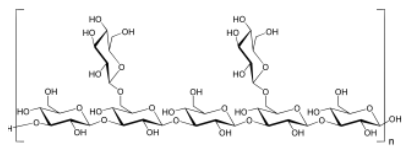
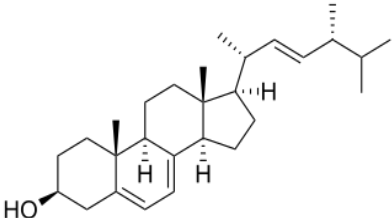
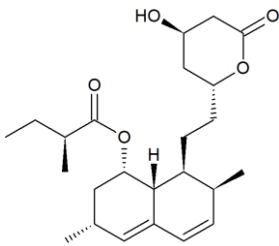
2.1.1.2 Propiedades hipocolesterolémicas

Los efectos hipocolesterolémicos de los hongos comestibles han sido ampliamente estudiados debido a su potencial para reducir los niveles de colesterol en sangre, gracias a que contienen diversos compuestos bioactivos, como β -glucanos, ergosterol, lovastatina y otros metabolitos secundarios, que desempeñan un papel clave en la regulación del metabolismo lipídico mediante una combinación de mecanismos mientras, los β -glucanos forman una capa viscosa en el intestino que interfiere con la absorción de colesterol y grasas (Friedman, 2016); la lovastatina inhibe la HMG-CoA reductasa, actúan a nivel hepático, inhibiendo la síntesis de colesterol. Adicionalmente, algunos metabolitos secundarios de los hongos también pueden modular la expresión de genes relacionados con el metabolismo lipídico, promoviendo un perfil lipídico más saludable (Uffelman *et al.*, 2023)

Entre los compuestos responsables de los efectos hipocolesterolémicos de los hongos destacan los β -glucanos, el ergosterol, un precursor de la vitamina D2 presente en hongos como *L. edodes* y *G. frondosa*, asociado a la inhibición de la síntesis de colesterol en el hígado al modular la actividad de la enzima HMG-CoA reductasa, un paso clave en la biosíntesis de colesterol (Cheung, 2010) La eritadenina tiene un historial de reducción de los niveles de colesterol y lípidos en investigaciones con animales mejorando la absorción tisular o inhibiendo la excreción tisular, la eritadenina reduce los niveles de colesterol sérico de manera más efectiva; Un estudio de mujeres jóvenes que consumieron 90 g de hongos shiitake frescos durante siete días observó una disminución del 12 % en los niveles promedio de colesterol en sangre (Camilleri *et al.* 2025). Además, Shiitake contiene eritadenina, un compuesto que reduce los niveles de colesterol sérico, mediante la inhibición de la enzima que regula la síntesis de colesterol en el hígado (Guillamón *et al.* 2010). Además, el consumo de hongos ricos en fibra también contribuye a disminuir la absorción intestinal de colesterol.

En términos generales el efecto hipocolesterolémico de los hongos comestibles es producto de la acción sinérgica entre polisacáridos estructurales y metabolitos secundarios (Cuadro 2) que actúan en etapas distintas del metabolismo lipídico, mientras que los β -glucanos ejercen un efecto primario a nivel intestinal al disminuir la absorción de colesterol y favorecer la excreción de sales biliares, compuestos como la lovastatina y el ergosterol intervienen directamente en la vía hepática del mevalonato mediante la inhibición o modulación de la HMG-CoA reductasa (Cheung, 2010). La evidencia experimental con modelos animales de ensayos clínicos con especies como *L. edodes* demuestra reducciones significativas de colesterol total y LDL, además de mejoras en HDL (Camilleri *et al.* 2025).

Cuadro 2. Compuestos hipocolesterolémicos presentes en los hongos comestibles.

Nombre y estructura química	Mecanismo hipocolesterolémico	Fuente
β-glucanos 	Polisacáridos no digeribles formados por enlaces β-(1$\rightarrow$3) y β-(1$\rightarrow$6). Actúan como fibra soluble aumentando la viscosidad intestinal y reduciendo la absorción de colesterol y ácidos biliares. Promueven la excreción fecal de sales biliares con incremento del uso hepático de colesterol para sintetizar nuevas sales biliares. Modulan el microbiota intestinal y favorecen la producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC), los cuales inhiben la síntesis hepática de colesterol.	Abundantes en la pared celular de basidiomicetos como <i>L. edodes</i>, <i>G. lucidum</i> y <i>P. ostreatus</i>, en <i>L. edodes</i>, el lentinano es un β-(1$\rightarrow$3) (1$\rightarrow$6)-glucano bioactivo.
Ergosterol 	Esterol fúngico estructuralmente similar al colesterol, puede competir con colesterol dietario por la absorción intestinal, disminuyendo su incorporación en micelas mixtas. Además, su conversión a vitamina D contribuye indirectamente al metabolismo lipídico. Modula la expresión de enzimas involucradas en la síntesis de colesterol.	Principal esteroide en membranas celulares de hongos como <i>L. edodes</i>, <i>A. bisporus</i> y <i>G. lucidum</i>. Su concentración varía según condiciones de cultivo y exposición a luz.
Lovastatina 	Metabolito secundario tipo policétido que actúa como inhibidor competitivo de la enzima HMG-CoA reductasa, enzima clave en la vía del mevalonato. Reduce la biosíntesis hepática de colesterol al bloquear la conversión de HMG-CoA en mevalonato, disminuyendo los niveles plasmáticos de LDL (colesterol de lipoproteína de baja densidad).	Producida principalmente por especies del género <i>P. ostreatus</i> y otros basidiomicetos. Se ha detectado en menores concentraciones en <i>L. edodes</i>, dependiendo del sustrato y condiciones metabólicas.

Adaptado de Cheung, 2010; Camilleri *et al.* 2025.

2.1.1.3 Efectos antidiabéticos

Los β -glucanos también son eficaces en la modulación de la respuesta glucémica, al retrasar junto con la fibra dietética la absorción de glucosa en el intestino, mejorar la sensibilidad a la insulina y regular los niveles de glucosa en sangre, tal es el caso de los polisacáridos extraídos del *G. lucidum* que tienen efectos hipoglucemiantes al mejorar la función pancreática y reducir la resistencia a la insulina (Zhao *et al.*, 2023).

Conjuntamente β -glucanos, terpenoides y compuestos fenólicos contribuyen a los efectos antidiabéticos de los hongos, debido a la actividad inhibitoria sobre las enzimas α -glucosidasa y α -amilasa, que son responsables de la descomposición de carbohidratos en glucosa. La inhibición de estas enzimas retrasa la absorción de glucosa, lo que ayuda a prevenir picos postprandiales en los niveles de glucosa sanguínea (Papoutsis *et al.*, 2021). Adicionalmente, algunos hongos, como *G. lucidum*, contienen triterpenos que mejoran la sensibilidad a la insulina al modular una vía de señalización como la PI3K/Akt, crucial para el metabolismo de la glucosa (Shaher *et al.*, 2020).

En modelos animales, el consumo de una mezcla de inulina y polisacáridos extraídos de *G. lucidum*, administrada por vía oral, mejoró drásticamente el peso corporal y el consumo equilibrado de alimentos al mejorar la utilización de carbohidratos, esto ocurrió como resultado de una mejor sensibilidad a la insulina. (Shamim *et al.*, 2023). También han evaluado el impacto del consumo de los hongos en humanos, un estudio en personas con diabetes tipo 2 mostró que el consumo diario de 50 gramos de *A. bisporus* durante ocho semanas resultó en una reducción significativa de los niveles de glucosa en ayunas y una mejora en los perfiles lipídicos (Guillamón *et al.*, 2010). En hongos comestibles como *P. ostreatus*, *G. lucidum*, *L. edodes* y *H. erunaceus* sus polisacáridos tienen un efecto terapéutico contra el síndrome metabólico, que se caracteriza por obesidad, hipertensión y niveles elevados de azúcar en sangre (Shamim *et al.*, 2023).

Por lo antes mencionado es claro que los efectos antidiabéticos de los hongos comestibles responden a un mecanismo multifactorial que integra regulación digestiva, modulación enzimática y señalización celular, lo que los hacen agentes funcionales con impacto metabólico integral. Así mientras los β -glucanos retrasan la absorción intestinal de glucosa y mejoran la sensibilidad a la insulina, los compuestos fenólicos y terpenoides inhiben enzimas clave como α -glucosidasa y α -amilasa, reduciendo los picos glucémicos postprandiales.

2.1.1.4 Vitaminas y minerales.

Los hongos comestibles son una fuente importante de vitaminas y minerales esenciales que contribuyen al mantenimiento de una dieta equilibrada y saludable, su composición nutricional los convierte en un alimento funcional con beneficios significativos para la salud humana (Cheung, 2010). Contienen una variedad de vitaminas, entre ellas, las del complejo B, tiamina (B1), riboflavina (B2), niacina (B3), ácido pantoténico (B5) y biotina (B7). Estas vitaminas son esenciales para el metabolismo energético y el funcionamiento adecuado del sistema nervioso. Por ejemplo, *A. bisporus* es particularmente rico en riboflavina y niacina, lo que lo convierte en una fuente de prevención de deficiencias de estas vitaminas en dietas basadas en plantas (Guillamón *et al.*, 2010).

También está presente en los hongos la vitamina D, aunque los hongos no la producen de manera natural, contienen ergosterol, un compuesto que se convierte en vitamina D2 cuando se expone a la luz ultravioleta, la vitamina D, en su forma de ergocalciferol, es relevante para la salud ósea, al facilitar la absorción de calcio y fósforo en el organismo (Hu *et al.*, 2021), y el sistema inmunológico. Además, los hongos son ricos en minerales como potasio, fósforo, magnesio, cobre, selenio y zinc. El potasio, presente en altas concentraciones en especies como *L. edodes*, es crucial para mantener el equilibrio electrolítico y la función muscular. El selenio, otro mineral abundante en *A. bisporus*, actúa como antioxidante al proteger las células del daño causado por los radicales libres (Kalac, 2009). El cobre y el zinc desempeñan roles importantes en la salud inmunológica y en la síntesis de colágeno, mientras que el magnesio contribuye a la salud cardiovascular y al funcionamiento adecuado de los músculos y nervios. Estudios han demostrado que los hongos comestibles tienen una biodisponibilidad relativamente alta de estos minerales, lo que permite su absorción eficiente por parte del organismo humano (de Souza *et al.*, 2023).

El perfil nutricional de los hongos comestibles incluye vitaminas hidrosolubles y liposolubles, y minerales esenciales (Figura 2); el consumo regular de hongos puede contribuir a suplir deficiencias de micronutrientes en poblaciones vulnerables (Cardwell *et al.* 2018). También son bajos en calorías, grasas y sodio, lo que los hace ideales para personas que buscan controlar su peso o mantener una dieta baja en sodio. Además, su alto contenido de fibra contribuye a la salud digestiva y puede ayudar a reducir el riesgo de enfermedades crónicas como la diabetes tipo 2 y las enfermedades cardiovasculares (Losoya-Sifuentes *et al.*, 2025).

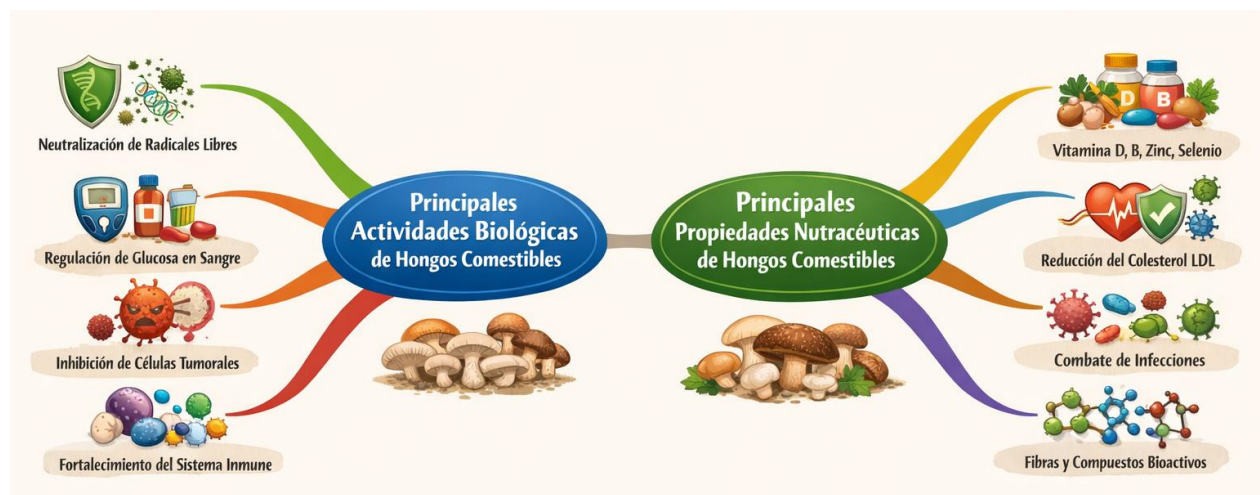


Figura 2. Beneficios de los hongos comestibles a la salud humana.

2.1.1.5 Actividad biológica de polisacáridos y β -glucanos

Los polisacáridos son macromoléculas formadas por largas cadenas de monosacáridos unidos por enlaces glucosídicos, en esta categoría están los β -glucanos que constan de unidades de glucosa unidas por enlaces β -(1 $\rightarrow$ 3) y β -(1 $\rightarrow$ 6) y están entre los componentes principales en los hongos comestibles, también se encuentran en levaduras, cereales (cebada y avena), bacterias y algas. La variabilidad en las ramificaciones y el peso molecular afecta sus propiedades fisicoquímicas y biológicas; por ejemplo, los β -glucanos derivados de hongos forman estructuras helicoidales, mientras que los de cereales son cadenas lineales con enlaces β -(1 $\rightarrow$ 4) adicionales (Wang *et al.*, 2017). Según Lei *et al.* (2015) los β -glucanos de levadura con bajo peso molecular tienen una mayor capacidad antioxidante e inmunológica. Por otro lado, se ha observado que las características estructurales de los polisacáridos, incluyendo su peso molecular, pueden influir en su actividad inmunomoduladora.

Es claro que la estructura química de estos polisacáridos les otorga propiedades biológicas, entre las que se encuentran, actividad inmunomoduladora, antioxidante, antitumoral y regulación del metabolismo de lípidos y glucosa (Du *et al.*, 2019). Así, los β -glucanos son capaces de activar macrófagos y linfocitos, lo que mejora la respuesta inmune (Wasser 2014). Estos compuestos interactúan con receptores específicos en células del sistema inmunológico, como Dectin-1 y CR3, presentes en macrófagos, neutrófilos y células dendríticas. Esta interacción desencadena vías de señalización que incluyen la producción de citocinas, activación de la fagocitosis y generación de especies reactivas de oxígeno (Han *et al.*, 2020). Y otros estudios han demostrado que tienen efectos anticancerígenos al inhibir la proliferación de células tumorales y estimular la apoptosis (Wang *et al.*, 2024).

2.2 Biotecnología en la producción de hongos medicinales

La biotecnología aplicada a la producción de hongos medicinales ha permitido avances significativos en la obtención de compuestos bioactivos con propiedades terapéuticas. Los hongos como *G. lucidum*, *Cordyceps sinensis* y *L. edodes* han sido ampliamente estudiados debido a sus propiedades inmunomoduladoras, antioxidantes y anticancerígenas (Roupas *et al.*, 2012). Estos organismos tienen un papel crucial en la medicina tradicional y moderna, ya que contienen metabolitos secundarios que contribuyen al tratamiento de diversas enfermedades. Además, la demanda creciente de productos naturales ha impulsado la investigación en nuevas estrategias de cultivo y optimización biotecnológica, buscando no solo aumentar el rendimiento, sino también garantizar la calidad de los productos finales (Chang y Wasser, 2012).

2.2.1 Técnicas de cultivo controlado en medio sólido

El cultivo controlado en fase sólida (FFS) es una de las técnicas más empleadas para la producción de hongos medicinales debido a su simplicidad y eficacia. Entre los sustratos más utilizados se encuentran materiales lignocelulósicos como aserrín, paja de trigo y cáscaras de arroz, enriquecidos con nutrientes específicos (Yang *et al.*, 2013) como fuentes de carbono complejas (celulosa y hemicelulosa), que los hongos degradan mediante enzimas lignocelulolíticas para liberar azúcares simples que son su fuente principal de energía y precursores metabólicos para el crecimiento y la biosíntesis de biomasa fúngica (Luis *et al.*, 2017).

Además, los medios sólidos deben incluir fuentes de nitrógeno como salvado de trigo o harinas de oleaginosas que proveen aminoácidos y compuestos nitrogenados esenciales para la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos durante el desarrollo metabólico del micelio. El hongo metaboliza estas fuentes a través de rutas catabólicas que liberan NH_3 y aminoácidos necesarios para la formación de enzimas y estructuras celulares fúngicas (Mleczek *et al.*, 2020). La relación carbono: nitrógeno (C:N) del sustrato influye directamente en la eficiencia de colonización micelial, una proporción óptima permite el balance energético necesario para sostener tanto el crecimiento vegetativo como la producción de metabolitos secundarios de interés (Luis *et al.*, 2017). Evidentemente, el sustrato es crucial, ya que afecta directamente la calidad y cantidad de compuestos producidos (Huang *et al.*, 2022), por ejemplo, el uso de sustratos enriquecidos con fuentes de nitrógeno y carbono puede estimular la producción de β -glucanos y otros polisacáridos con propiedades medicinales (Chang y Wasser, 2012).

También los nutrientes minerales como fósforo (P), potasio (K) y magnesio (Mg) son fundamentales porque participan en la síntesis de ATP (energía metabólica), activación de coenzimas y estabilidad de membranas celulares durante la diferenciación y expansión micelial en sustratos sólidos. Igualmente, oligoelementos traza (como Fe, Zn, Mn y Cu) son importantes en la nutrición fúngica porque actúan como cofactores de enzimas implicadas en rutas metabólicas clave, incluida la producción de enzimas hidrolíticas que catalizan la ruptura de polímeros complejos en el sustrato, facilitando la disponibilidad de nutrientes para el micelio fúngico (Mleczek *et al.*, 2020). Indudablemente el control de los factores ambientales como la temperatura, la humedad y el pH, es clave en el crecimiento micelial uniforme, en la maduración de los carpóforos y en una mayor producción de metabolitos bioactivos (Yang *et al.*, 2013). Estudios previos han demostrado que el control adecuado de la humedad relativa y la aireación favorecen la fructificación, permitiendo la obtención de productos de alta calidad (Yang *et al.*, 2013).

Por otro lado, la fermentación en estado líquido (FEL) o fermentación sumergida (FS) es una alternativa viable al cultivo en medio sólido (Cuadro 3), que permite un control más preciso de las condiciones de cultivo y una escalabilidad mayor (Kunhorm *et al.*, 2022); en este proceso biotecnológico el hongo se cultiva en un medio acuoso bajo condiciones

controladas de oxígeno, temperatura y agitación, permitiendo un crecimiento uniforme del micelio y la síntesis de metabolitos de interés, a diferencia de cultivos en fase sólida, el agua es el principal componente del medio, lo que facilita la difusión de nutrientes, el control del pH y del oxígeno disuelto (Bakratsas *et al.*, 2021).

Cuadro 3. Comparación entre las características y aplicaciones de fermentación en fase sólida (FFS) y fermentación sumergida (FS) en el cultivo de hongos.

Característica	Fermentación en estado sólido (SSF)	Fermentación en estado líquido (SmF)
Estado del medio	Sólido o semisólido sin agua libre	Medio acuoso con agua como fase principal
Distribución del micelio	Crece sobre superficie y partículas sólidas	Distribución uniforme en todo el volumen
Inoculación	Tamaño de inoculación grande (>10 %)	Menor tamaño de inoculación (<10 %)
Transferencia de oxígeno	Limitada por difusión de gases en sólido	Controlada por oxígeno disuelto en líquido
Control de variables	Difícil (pH y temperatura)	Fácil y en tiempo real
Escalabilidad	Más simple pero menos controlable	Escalable a biorreactores industriales
Producción de metabolitos	Alta para compuestos extracelulares	Alta para biomasa y metabolitos intracelulares
Requerimiento de energía	Menor	Mayor por agitación y aireación
Formación de carpóforos	Si forman carpóforos	No forman carpóforos

2.2.2 Factores para la optimización del cultivo

La optimización biotecnológica se centra en mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción de hongos medicinales mediante técnicas avanzadas de mejoramiento (Figura 3) para obtener cepas con un mayor rendimiento y más biocompuestos para uso comercial o a gran escala (Huang y Zambonelli, 2024). Una de las estrategias principales es la selección y mejora de cepas, con técnicas tradicionales de mejoramiento como mutagénesis aleatoria secuencial y cribado mediante recombinación, mutación y selección en condiciones controladas (Dong *et al.*, 2022).

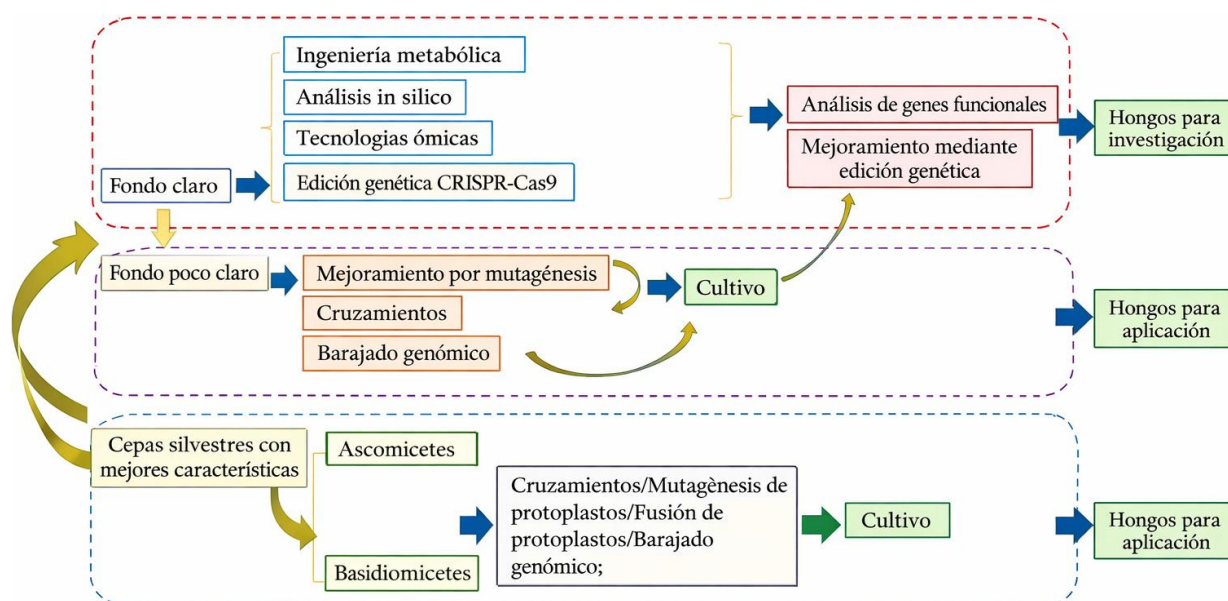


Figura 3. Mejoramiento genético de hongos (Dong *et al.*, 2022).

Cabe señalar que la capacidad de sufrir mutaciones es una propiedad inherente del material genético, que incluye tanto los genes como los cromosomas en los que los genes están dispuestos linealmente en un orden determinado (Lynch *et al.*, 2016); existe la mutagénesis química, física y combinada. Mientras que los mutágenos químicos en altas concentraciones pueden causar daño celular, letalidad y lesión genética; las concentraciones adecuadas inducen o suprimen sistemas de reparación celular, y la accesibilidad de diferentes regiones del genoma (Hussain *et al.*, 2020). Además, la radiación ultravioleta es uno de los métodos físicos más eficaces para la mejora de cepas, pero tiene fuertes efectos genotóxicos que pueden dañar el ADN (Dong *et al.*, 2022).

Otro método destacable es la fusión de protoplastos que consiste en eliminar la pared celular para luego fusionar sus membranas y citoplasma, es una alternativa eficaz para hongos que carecen de capacidad para reproducirse sexualmente, además demuestra una alta capacidad para el desarrollo de híbridos y mejoramiento de cepas en hongos filamentosos, comestibles y medicinales (Huang y Zambonelli, 2024). Otra opción es el sistema de edición genética CRISPR/Cas9 que incluye tres componentes básicos: los ARN CRISPR (ARNcr), la proteína asociada a CRISPR (Cas) y el ARNcr transactivador (ARNtracr), este método se ha aplicado ampliamente en diversas especies, como células vegetales, bacterias, animales e incluso algunos hongos (Liu *et al.*, 2019) para la inserción, reemplazo y/o expresión de genes.

Además, la ingeniería metabólica representa un enfoque prometedor para manipular rutas biosintéticas y maximizar la producción de compuestos específicos. Por ejemplo, la sobreexpresión de genes relacionados con la síntesis de polisacáridos en *L. edodes* ha

mostrado resultados alentadores, incrementando significativamente la concentración de estos compuestos en los productos finales (Byron *et al.*, 2018).

2.3 Efecto de las condiciones de cultivo en la composición nutraceutica en los hongos de la pudrición blanca

Los hongos de la pudrición blanca (HPB) son un grupo de organismos fúngicos capaces de degradar lignina y otros componentes complejos de la madera, gracias a su capacidad enzimática única. Además de su papel ecológico, los HPB tienen potencial en la producción de compuestos nutraceuticos, como polifenoles, polisacáridos y antioxidantes. *L. edodes* es un HPB que destaca por su valor nutraceutico y aplicaciones en la salud humana. Las condiciones de cultivo y los factores ambientales, así como el tipo de sustrato utilizado para su cultivo influyen en su composición y su perfil nutraceutico (Wolters *et al.*, 2015; Petre y Petre, 2016,).

2.3.1 Factores ambientales

Las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad, el pH y la disponibilidad de oxígeno, tienen un impacto directo en el crecimiento de los HPB y en la producción de compuestos bioactivos; por ejemplo, la temperatura afecta tanto la velocidad de crecimiento como la actividad enzimática. Una temperatura entre 22 y 25 °C (Cuadro 4) favorece la producción de polisacáridos con propiedades inmunomoduladoras y antioxidantes en *L. edodes* (Petre y Petre, 2016). Cabe destacar que la etapa micelar puede desarrollarse entre 5 y 32 °C, según la cepa cultivada. La formación de primordios (iniciación de fructificación) suele requerir un cambio ambiental marcado, conocido como “choque térmico” o fluctuación de temperatura, esto emula las variaciones naturales de estaciones templadas, donde las temperaturas más bajas de la noche o del otoño inducen la formación de estructuras reproductivas. En la práctica, la iniciación de primordios se logra con temperaturas entre 10 °C y 20 °C tras un periodo de incubación a temperaturas más elevadas (W. Chen., 2005).

Cuadro 4. Requerimientos de temperatura de acuerdo con la etapa del cultivo de *L. edodes* según la cepa utilizada.

Etapa	T de crecimiento (°C)	T óptima (°C)
Germinación de esporas	15-28	22-26
Crecimiento micelial	5-32	24-27
Fructificación	5-25	15 +/- 1-2

Adaptado de Chen., 2005.

La humedad relativa del aire y la humedad del sustrato son parámetros ambientales esenciales para garantizar que el micelio pueda crecer sin estrés hídrico y que los

cuerpos fructíferos se desarrollen correctamente (Herman y Bleichrodt, 2025). Durante la incubación del micelio, un contenido de humedad óptimo en el sustrato suele situarse alrededor de 60 %–70 %, ya que una humedad excesiva puede limitar la oxigenación y favorecer el crecimiento de microorganismos contaminantes, mientras que una humedad insuficiente detiene el crecimiento micelial (Herman y Bleichrodt, 2025).

Para la fructificación, la humedad relativa ambiental debe ser alta, comúnmente entre 80 % y 95 %, niveles de humedad por debajo de este rango pueden provocar que los primordios se deshidraten o que los cuerpos fructíferos presentan grietas y defectos en los sombreros (Petre y Petre, 2016). Por el contrario, humedades excesivas sin adecuada ventilación pueden aumentar la incidencia de contaminaciones por mohos u otros hongos competidores. La humedad debe ser especialmente monitoreada durante la transición entre fases de cultivo, ya que los hongos responden de manera diferente según su estado fisiológico. Por ejemplo, una humedad alta durante la incubación puede incrementar el riesgo de contaminación, mientras que durante la fructificación resulta indispensable para la expansión de los tejidos fúngicos y el mantenimiento de su turgencia.

Además, el pH juega un papel crucial, valores ligeramente ácidos (5.5 - 6.5) favorecen la actividad enzimática; en *L. edodes*, un pH de 3.5 - 5.5 es óptimo para la producción de cuerpos fructíferos y consecuentemente de lentinano (Chen, 2005), se ha observado que un ambiente ligeramente ácido (pH 5.0 - 6.0) favorece una mejor colonización del sustrato y reduce la proliferación de bacterias y hongos contaminantes (Herman y Bleichrodt, 2025). A lo largo del cultivo el pH puede variar por los procesos enzimáticos realizados por el organismo.

La disponibilidad de oxígeno también es esencial, especialmente para la biosíntesis de metabolitos secundarios, los hongos comestibles como *L. edodes* son organismos aerobios, lo que significa que requieren oxígeno (O₂) para realizar la respiración celular y mantener un adecuado crecimiento y metabolismo; por ello el intercambio gaseoso adecuado es fundamental, ya que concentraciones elevadas de dióxido de carbono (CO₂) pueden inhibir procesos fisiológicos como la formación de los cuerpos fructíferos y provocar elongación excesiva del estípite (Chen, 2005). Concentraciones de CO₂ mayores al 1% inhiben la maduración del esporoma y por encima del 5% impiden la formación de cuerpos fructíferos; la concentración de este gas debe ser mayor 1000 ppm en fases de colonización y por debajo de las 800 ppm en fructificación (Cheng *et al.*, 2021), mientras que una mayor concentración de oxígeno en la fase de fructificación favorece el crecimiento micelial y la calidad y desarrollo del fruto (Silva *et al.*, 2010). El efecto de los factores ambientales en el desarrollo de los hongos comestibles durante su cultivo se ilustra en la Figura 4.

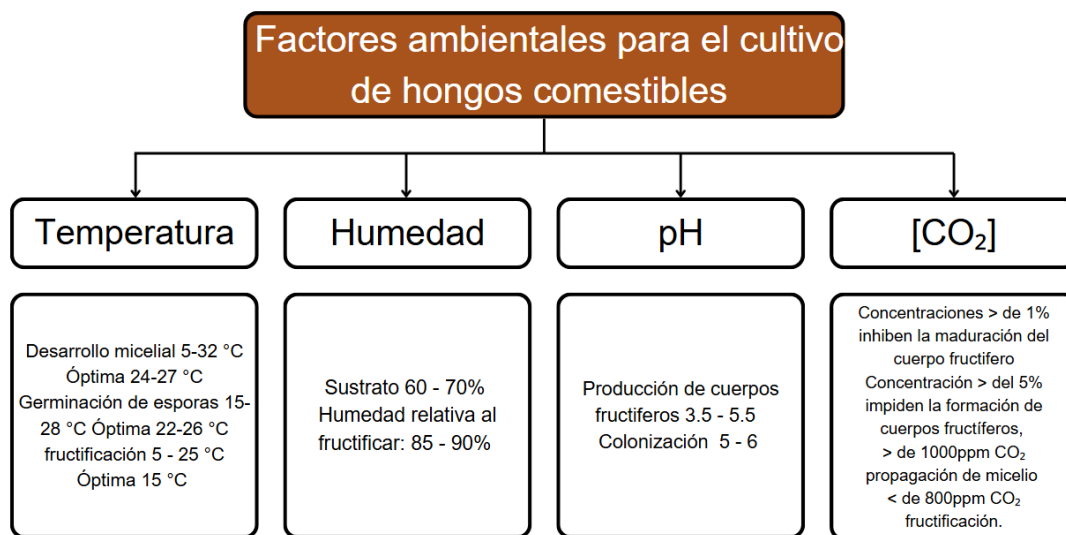


Figura 4. Factores ambientales para el cultivo de hongos comestibles.

2.3.2 Tipo de sustrato

El sustrato es otro factor determinante en la composición nutracéutica de *L. edodes*, este hongo puede crecer en una amplia variedad de materiales lignocelulósicos, como residuos agrícolas, aserrín y bagazo. La elección del sustrato influye directamente en la disponibilidad de nutrientes y precursores químicos necesarios para la producción de metabolitos secundarios. En el caso de *L. edodes*, el aserrín de madera dura enriquecido con salvado de trigo es el sustrato más utilizado, ya que promueve la producción de lentinano y otros polisacáridos bioactivos (Martínez Carrera, 2010) además, muestra una alta adaptabilidad a sustratos como bagazo de caña, paja de trigo, cáscara de arroz, etc.; que favorecen la producción enzimática y por tanto una fructificación más pronta y a su vez metabolitos de interés (Narvaez *et al.*, 2022).

2.3.3 Interacción entre factores ambientales y sustrato

Los efectos de los factores ambientales y del sustrato no son independientes, sino que interactúan de manera compleja. Por ejemplo, un sustrato enriquecido con lignina puede requerir condiciones óptimas de temperatura y pH para maximizar la actividad de las enzimas ligninolíticas. En el caso de *L. edodes* posee una capacidad adaptativa más eficiente en variaciones de pH y composición de sustrato sin embargo una buena eficiencia biológica y mayor producción de compuestos nutracéuticos de interés se ven directamente relacionados con la formulación del sustrato, relación C/N dentro del mismo, la temperatura, pH y el contenido de humedad (Silva *et al.*, 2010), controlando adecuadamente los parámetros antes mencionados aunado a una correcta formulación

de sustrato, se puede eficientizar la producción tanto de cuerpos fructíferos como de los compuestos nutraceuticos de interés.

2.4 Impacto económico del cultivo de hongos

El cultivo de hongos representa una actividad económica importante a nivel global, especialmente en países como China, Estados Unidos, Países Bajos y México. Según datos de la FAO (2021), la producción mundial de hongos comestibles superó los 12 millones de toneladas en 2020, con un valor de mercado estimado en 50 mil millones de dólares. Este crecimiento se debe, en parte, a la creciente demanda de alimentos funcionales y nutraceuticos, como el lentinano presente en *L. edodes* que han demostrado propiedades inmunomoduladoras, anticancerígenas (Wasser, 2017).

En el caso específico de los hongos shiitake, su valor económico no solo radica en su consumo directo, sino también en la extracción de compuestos bioactivos para la industria farmacéutica y nutraceutica. Por ejemplo, el mercado global de suplementos a base de hongos medicinales se valoró en 18 mil millones de dólares en 2022 y se espera que crezca a una tasa anual del 8.5% hasta 2030 (Grand View Research, 2023). Este crecimiento está impulsado por la creciente conciencia sobre los beneficios para la salud de estos compuestos y su potencial para prevenir enfermedades crónicas.

Además, el cultivo de hongos es una actividad que puede ser implementada en pequeñas y medianas escalas, lo que la convierte en una opción viable para comunidades rurales y emprendedores. Según Martínez-Carrera *et al.* (2010), el cultivo de hongos puede generar ingresos significativos para familias y cooperativas, especialmente cuando se utilizan sustratos de bajo costo, como residuos agrícolas. Esto no solo reduce los costos de producción, sino que también contribuye a la economía circular al aprovechar desechos que de otra manera serían quemados o desechados.

2.5 Impacto ambiental del cultivo de hongos

El cultivo de hongos es considerado una de las prácticas agrícolas más sostenibles debido a su bajo impacto ambiental y su capacidad para utilizar residuos orgánicos como sustratos. Según Scholtmeijer *et al.* (2023), los hongos son descomponedores naturales que transforman materiales lignocelulósicos, como paja, aserrín y bagazo, en biomasa comestible y compuestos bioactivos. Este proceso no solo reduce la acumulación de residuos agrícolas, sino que también disminuye la huella de carbono asociada con su eliminación.

Uno de los aspectos más destacados del cultivo de hongos es su eficiencia en el uso de recursos. A diferencia de otros cultivos, los hongos requieren menos agua y recursos

para su producción. Por ejemplo, un estudio realizado por Royse *et al.* (2017) demostró que la producción de 1 kg de shiitake requiere aproximadamente 15 litros de agua, en comparación con los 1,000 litros necesarios para producir 1 kg de carne de res. Esta eficiencia hace que el cultivo de hongos sea una alternativa viable en regiones con escasez de agua o suelos degradados.

Además, el uso de residuos agrícolas como sustratos no solo reduce los costos de producción, sino que también contribuye a la mitigación del cambio climático. Según Budihardjo *et al.*, (2021), la descomposición anaeróbica de residuos agrícolas en vertederos genera metano, un gas de efecto invernadero 25 veces más potente que el dióxido de carbono. Al utilizar estos residuos como sustratos para el cultivo de hongos, se evita su descomposición en vertederos y se reduce la emisión de gases de efecto invernadero. Otro aspecto relevante es la capacidad de los hongos para restaurar suelos degradados. Varias especies de hongos, como *L. edodes*, producen enzimas ligninolíticas que descomponen compuestos orgánicos complejos y mejoran la estructura del suelo (Grimm y Wösten, 2018). Esto no solo aumenta la fertilidad del suelo, sino que también promueve la biodiversidad al crear un hábitat adecuado para microorganismos beneficiosos.

2.5.1 Residuos agroindustriales empleados para la formulación de sustratos

El aprovechamiento de residuos agroindustriales como sustratos para la producción de hongos comestibles y medicinales es una estrategia de la economía circular, ya que permite valorizar biomasa lignocelulósica que, en muchos casos, carece de un aprovechamiento. Estos residuos tienen diferentes proporciones de celulosa, hemicelulosa, lignina y compuestos nitrogenados que son utilizados como fuente de carbono y nutrientes durante el desarrollo micelial de *L. edodes* (Chen *et al.*, 2026). Asimismo, la utilización de subproductos agroindustriales disminuye los costos de producción, reduce los problemas asociados con la disposición final de residuos y contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante la reincorporación de materiales al sistema productivo (Grimm y Wösten, 2018). Diversos estudios han demostrado que la formulación adecuada del sustrato, particularmente el equilibrio de la relación carbono: nitrógeno, influye directamente sobre la colonización del micelio, la eficiencia biológica y la síntesis de metabolitos bioactivos como el lentinano, razón por la cual la selección de adecuada de residuos agroindustriales constituye un factor determinante en el cultivo de *L. edodes* (Safaie., *et al.* 2024).

Entre los residuos utilizados en esta investigación destaca el bagazo de malta, subproducto generado durante la elaboración de cerveza después del proceso de maceración del grano, este representa alrededor del 85 % de los residuos sólidos

producidos por la industria cervecera, con una generación cercana a 20 kg de bagazo húmedo por cada 100 L de cerveza elaborada (Lynch *et al.*, 2016). En México, la industria cervecera produce más de 140 millones de hectolitros de cerveza por año (INEGI., 2025), la cantidad de bagazo generado supera los 2.5 millones de toneladas anuales en base húmeda, constituyendo uno de los principales subproductos agroindustriales del país. Este residuo posee un elevado contenido de fibra (celulosa, hemicelulosa y lignina), además de proteínas (20–30 % en base seca), minerales y compuestos fenólicos, características que favorecen el crecimiento de hongos ligninolíticos. Sin embargo, su elevada humedad (70–80 %) acelera su deterioro microbiológico, por lo que requiere un procesamiento o secado oportuno para evitar pérdidas de calidad (Lynch *et al.*, 2016). Por lo tanto, su incorporación en sustratos para el cultivo de hongos incrementa el contenido de nitrógeno disponible y mejora las propiedades nutricionales del medio de cultivo.

Por otra parte, la cáscara de haba seca (*Vicia faba* L.) es otro residuo agroindustrial con alto potencial de valorización, generado durante el descascarado industrial destinado a la obtención de granos para consumo humano. Se ha estimado que las cubiertas de la semilla constituyen alrededor del 6 % del peso del grano (Ivarsson *et al.*, 2021). En México, la producción anual de haba supera las 50 mil toneladas, concentrándose principalmente en los estados del altiplano central (INEGI., 2025), por lo que este subproducto representa una fuente importante de biomasa poco aprovechada. Su composición rica en fibra estructural y carbohidratos complejos permite su utilización como sustrato para hongos de pudrición blanca, favoreciendo la degradación de compuestos lignocelulósicos mediante la maquinaria enzimática de hongos lignolíticos. Además, se ha demostrado que este residuo puede emplearse exitosamente en el cultivo de hongos, reduciendo simultáneamente el contenido de compuestos antinutricionales presentes originalmente en la biomasa, lo que incrementa el valor del sustrato residual después del cultivo (Ivarsson *et al.*, 2021).

Y otro residuo agroindustrial generado durante la industrialización de semillas de calabaza (*Cucurbita pepo* L.) es la cáscara, en este sector México es uno de los principales productores de calabaza en América Latina, con una producción superior a 120 mil toneladas anuales (INEGI., 2020), de las cuales una fracción considerable corresponde al procesamiento industrial de semillas, originando grandes cantidades de residuo que generalmente son destinadas a alimentación animal o desechadas. Estas cáscaras tienen un elevado contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, lo que las convierte en una fuente potencial de carbono para hongos ligninolíticos, además de compuestos fenólicos y pequeñas cantidades de proteínas. Desde el punto de vista ambiental, la valorización de este residuo contribuye a disminuir la acumulación de biomasa agrícola y favorece el aprovechamiento integral de la cadena productiva de la calabaza dentro de esquemas de bioeconomía circular (Massironi *et al.*, 2023).

2.6 *Lentinula edodes*

2.6.1 Generalidades

El hongo *L. edodes*, conocido comúnmente como shiitake, es una de las especies de hongos comestibles más cultivadas en el mundo (Song *et al.*, 2025). El Shiitake pertenece a la clase de los Agaricomycetes, que incluye la mayoría de los hongos con sombrero y pie, y está clasificado dentro de la familia Omphalotaceae (Figura 5), conocida por incluir hongos saprótrofos que descomponen la materia orgánica (Duque *et al.*, 2015).

Reino: Fungi

División: Basidiomycota

Clase: Agaricomycetes

Orden: Agaricales

Familia: Omphalotaceae

Género: *Lentinula*

Especie: *Lentinula edodes*



Figura 5. Taxonomía y carpóforo de Lentinula edodes (Duque et al., 2015).

Desde una perspectiva biológica, el ciclo de vida del *L. edodes* es complejo e incluye varias etapas diferenciadas que se alternan entre formas haploides y dicarióticas. La fase inicial comienza con la germinación de esporas haploides en condiciones favorables, dando lugar al crecimiento de un micelio primario monocariótico. Este micelio puede fusionarse con otro compatible mediante un proceso de plasmogamia, formando micelio secundario dicariótico, el cual es capaz de desarrollar los cuerpos fructíferos (Ha *et al.*, 2019).

Los cuerpos fructíferos, también conocidos como setas, representan la estructura reproductiva del hongo. En su interior, las células basidiales realizan meiosis para generar nuevas esporas haploides que reinician el ciclo. Este proceso depende de factores ambientales como la temperatura, humedad y disponibilidad de nutrientes (Song *et al.*, 2025). Es importante destacar que el micelio puede permanecer en estado

vegetativo durante largos períodos si las condiciones no son propicias para la fructificación, adaptándose así a su entorno.

El origen del *L. edodes* se ubica en Asia, particularmente en China y Japón, donde su cultivo data de hace más de mil años. Tradicionalmente, su producción se realizaba en troncos de madera dura, como los de roble y haya, pero en la actualidad también se emplean sustratos artificiales compuestos por aserrín, salvado de trigo y otros materiales lignocelulósicos (Martínez-Carrera, 2010). Las condiciones óptimas de cultivo incluyen temperaturas entre 20 y 25 °C, alta humedad relativa (80-90 %) y un pH cercano a la neutralidad (Petre y Petre, 2016). Estas características han permitido que el cultivo del shiitake se expanda a nivel global, consolidándose como una fuente importante de alimento y compuestos bioactivos.

2.6.2 Componentes nutraceuticos

L. edodes es reconocida por su alto valor nutraceutico, gracias a su composición rica en proteínas, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos. Contiene vitaminas del complejo B, como la tiamina, riboflavina y niacina, además de ergosterol (Ahmad *et al.*, 2023). Estas vitaminas desempeñan roles clave en el metabolismo energético y la salud del sistema nervioso.

Entre los minerales presentes, destacan el potasio, hierro, zinc y selenio, los cuales contribuyen a sus beneficios para la salud (Cheung, 2010). Estos minerales participan en funciones antioxidantes, el transporte de oxígeno y la regulación del sistema inmunológico. Los antioxidantes, como los compuestos fenólicos y flavonoides, también se encuentran en concentraciones notables, desempeñando un papel crucial en la reducción del estrés oxidativo y la prevención de enfermedades crónicas (Cheung, 2010).

Asimismo, el hongo es una fuente significativa de aminoácidos esenciales, fibra dietética la cual no solo mejora la digestión, sino que también contribuye a la regulación de los niveles de colesterol además de glucosa en la sangre. Y polisacáridos como el lentinano, un β -glucano con propiedades inmunomoduladoras (Ahmad *et al.*, 2023).

2.7 Lentinano

El lentinano (Figura 6) es un polisacárido bioactivo, ampliamente reconocido por sus propiedades inmunomoduladoras y antitumorales. Este compuesto, clasificado como un betaglucano, ha sido objeto de numerosos estudios debido a su capacidad para estimular el sistema inmunológico pues activa células clave como macrófagos, células asesinas naturales (NK) y linfocitos T, lo que lo convierte en un agente prometedor para el tratamiento de diversas enfermedades (Trivedi *et al.*, 2022). Su mecanismo de acción se

basa en la interacción con receptores específicos en la superficie de las células inmunitarias, lo que desencadena una serie de respuestas biológicas beneficiosas.

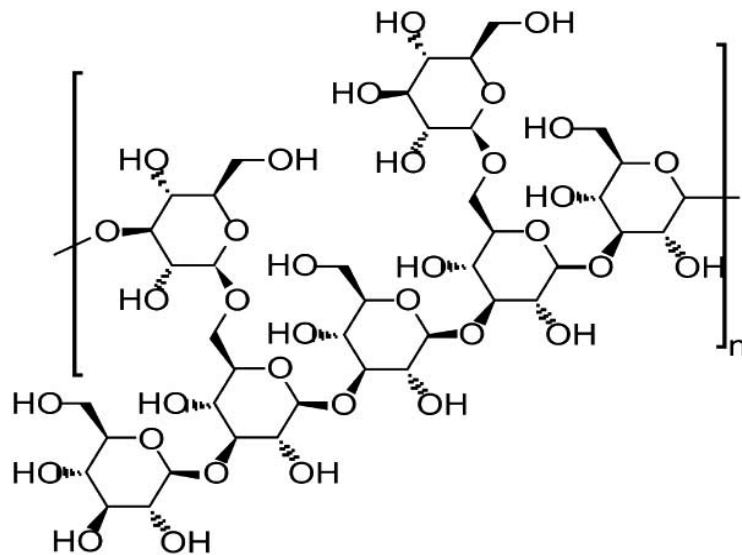


Figura 6. Lentinano: β -(1,3) glucanos con cadena lateral β -(1,6), 2 unidades de cadena lateral por cada 5 unidades monoméricas unidas β -(1,3).

2.7.1 Características

El lentinano es un polisacárido conformado por cadenas de glucosa unidas por enlaces β -1,3 y ramas de enlaces β -1,6, lo que le confiere una estructura helicoidal triple altamente estable (Kour *et al.* 2022). Tiene estructuras de triple hélice a temperatura ambiente, lo que le confiere viscosidad y tolerancia a un intervalo amplio de pH, temperatura y concentraciones de sal en solución acuosa, debido a sus propiedades reológicas y de solubilidad en agua es de interés en productos alimenticios (Hu *et al.*, 2024). La estabilidad estructural del lentinano es fundamental para su interacción con los receptores del sistema inmunológico, facilitando su función como agente inmunomodulador.

2.7.2 Composición química

Químicamente, el lentinano está constituido por un 98 % de polisacáridos, siendo el restante pequeños componentes proteicos que contribuyen a su bioactividad, su peso molecular varía entre 500 y 800 kDa, dependiendo del método de extracción y purificación utilizado (Kour *et al.* 2022). Los enlaces β -1,3 presentes en su estructura son responsables de su capacidad para interactuar con los receptores del sistema inmunológico, desencadenando respuestas celulares específicas (Du *et al.*, 2019).

2.7.3 Actividad bioquímica

El lentinano es conocido por sus efectos inmunomoduladores y antitumorales. Actúa estimulando la actividad de macrófagos, células dendríticas y linfocitos T, lo que incrementa la producción de citocinas como el factor de necrosis tumoral- α (TNF- α), la interleucina-1 β (IL-1 β) y la interleucina-6 (IL-6) (Trivedi *et al.*, 2022). Estas citocinas desempeñan un papel crucial en la regulación del sistema inmunológico y la respuesta frente a infecciones y tumores. Además, se ha demostrado que el lentinano potencia la eficacia de ciertos tratamientos quimioterápicos, mejorando la calidad de vida en pacientes oncológicos (Ahmad *et al.*, 2023).

El lentinano también posee propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, protegiendo a las células del daño oxidativo y reduciendo los marcadores inflamatorios en diversas patologías (Trivedi *et al.*, 2022). Su capacidad para modular el microbioma intestinal también ha sido reportada, favoreciendo el crecimiento de bacterias beneficiosas como *Lactobacillus* y *Bifidobacterium* (Chen *et al.*, 2012). Esto sugiere que el lentinano puede tener un impacto positivo en la salud intestinal y el bienestar general. Además activa vías de señalización, como MAPK, NF- κ B y Syk-PKC a través de la unión a receptores de reconocimiento de patrones (TLR, Dectin-1) y al receptor del complemento tipo 3 (CR3, también conocido como CD11b/CD18) en la membrana de células inmunitarias (Zhang *et al.*, 2018),

2.8 Fundamento de la técnica de cuantificación de Lentinano

La cuantificación de lentinano mediante espectrofotometría utilizando el colorante rojo Congo se fundamenta en la especificidad de la interacción de este colorante con los β -(1 $\rightarrow$ 3)-glucanos con ramificaciones β -(1 $\rightarrow$ 6), característica estructural del lentinano (Nitschke *et al.*, 2011), que lleva a la formación de un complejo estable entre las cadenas helicoidales del polisacárido y las moléculas de colorante, generando un desplazamiento del máximo de absorbancia alrededor de 510 nm (Jafari *et al.*, 2023). Este principio analítico permite una determinación rápida, económica y reproducible, ideal para ensayos comparativos en etapas de cultivo o entre formulaciones de sustrato. A diferencia de técnicas cromatográficas (cromatografía líquida de alta resolución o cromatografía de permeación en gel), el método de rojo Congo no requiere purificación exhaustiva, permitiendo la cuantificación de β -glucanos totales en extractos crudos, lo cual es ventajoso para estudios de optimización biotecnológica (Nitschke *et al.*, 2011).

2.9 Hipótesis

La composición química del sustrato a base de aserrín de encino suplementado con bagazo de malta o cáscara de haba seca o cáscara de semilla de calabaza influye en la concentración de lentinano producido en el carpóforo de *L. edodes*.

2.10 Objetivo General

Determinar el efecto de la composición de sustrato suplementado con los diferentes residuos agroindustriales en la producción de lentinano en cuerpos fructíferos de Shiitake bajo condiciones de cultivo piloto para establecer la revalorización de dichos residuos y optimizar la producción de lentinano.

2.11 Objetivos particulares

1. Formular diferentes mezclas de aserrín de encino con bagazo de malta, cáscara de haba seca, cáscara de semilla de calabaza para el cultivo de shiitake (*L. edodes*).
2. Determinar el tiempo de aparición y la eficiencia biológica de shiitake en las mezclas de sustratos diseñadas
3. Cuantificar la concentración de lentinano en los cuerpos fructíferos de shiitake cultivados en los diferentes sustratos

III. Metodología

3.1 Material biológico y reactivos

La cepa de *L. edodes* proviene de un carpóforo maduro donado por un productor de Shiitake a pequeña escala en Zacatlán, Puebla. Mientras que los reactivos utilizados en este estudio fueron NaH_2PO_4 (J.T. Baker) grado reactivo, Na_2HPO_4 (J.T. Baker) grado reactivo, Esquizofilano (CONTIPRO) grado reactivo, EtOH 96%, el rojo Congo (Fagalab), agar papa dextrosa, PDA (MCD LAB), extracto de malta seco, DME (HAZCHELA).

3.1.1 Aislamiento del micelio de shiitake

Los cuerpos fructíferos fueron desinfectados superficialmente con alcohol al %70, luego, en condiciones asépticas, fue realizado un corte longitudinal del centro del cuerpo fructífero hasta el estípite, posteriormente un pequeño trozo del píleo, justo donde este termina e inicia el estípite fue inoculado en cajas Petri conteniendo PDA, previamente esterilizado a 121°C durante 15 min en una olla expres Presto de 21 L con barómetro (Suárez y Holguín, 2011). En seguida las cajas Petri fueron incubadas a entre 20 y 24 °C durante 12-15 días, luego fueron realizadas al menos dos transferencias de micelio a PDA fresco bajo las mismas condiciones.

3.1.2 Preparación del inóculo

Una vez que el micelio creció en el agar, el agar invadido con micelio fue cortado en cubos de 3 cm³ que fueron inoculados en medio de cultivo líquido que fue preparado hirviendo 300 g de papa limpia troceada en 1 L de agua destilada, luego la infusión fue filtrada y al filtrado le fueron agregados 20 mL de miel hasta disolver por completo. Este caldo de cultivo fue esterilizado a 121 °C durante 15 min. Se incubaron a 20-24 °C durante 12-15 días, una vez colonizado el medio de cultivo líquido, este fue usado como inóculo para grano de maíz palomero. De igual forma el grano a inocular llevó un proceso el cual se describe a continuación:

3.1.3 Preparación del inóculo

El acondicionamiento de los granos de cereal para la preparación del inóculo se llevó a cabo de la manera siguiente: los granos de maíz fueron sometidos a remojo en agua corriente durante 24 h, posteriormente el agua excedente fue drenada y los granos enjuagados con agua corriente. Entonces, una olla a presión (express) con agua suficiente para rebasar 5 cm el nivel de los granos, fue sometida a calentamiento hasta la ebullición, luego se agregó el maíz previamente escurrido y la olla fue cerrada y mantenida a fuego constante por 50 min, después de la despresurización la olla fue abierta y el agua no absorbida por el maíz fue drenada y agua fría fue vertida sobre el maíz para detener la cocción, después los granos fueron escurridos en un colador para

eliminar el agua excedente, durante 1 - 2 h, esto permitió obtener la humedad adecuada el grano. Finalmente, 2 kg del cereal cocinado fue embolsado en bolsas de polipropileno con dimensiones de 48x15x20cm y 6.5 L de capacidad dotadas con filtro de 5 μ m (mushbags) y esterilizado a 121 °C, 15 psi durante 90 min.

La inoculación de grano se hizo de acuerdo con la metodología de Romero-Arenas et al. (2017) con modificaciones, este proceso fue realizado bajo un FFU (unidad de filtro con ventilador) con un filtro HEPA H14 con una eficiencia del 99.9997 %, previamente desinfectada con hipoclorito al 3%, luego 10 mL del cultivo líquido fueron inoculados en 2 kg de grano estéril, después la biomasa inoculada fue incubada para la propagación del micelio durante 10 a 22 días, hasta la invasión completa del grano de maíz. Este micelio propagado en el maíz fue usado como inóculo para los sustratos evaluados.

3.2 Diseño experimental

El diseño experimental para probar la hipótesis fue por bloques completamente al azar con tres tratamientos y un control que fue el sustrato convencional para el cultivo de shiitake que está conformado por aserrín de encino y salvado de trigo 70:30 p/p (cuadro 5), el factor de variación evaluado fue la composición del sustrato y las variables de respuesta fueron los μ g de lentinano/g de hongo seco y la eficiencia biológica, las unidades experimentales fueron establecidas por cuatuplicado.

Cuadro 5. Diseño experimental para evaluar el efecto de la composición del sustrato en la producción de lentinano y la eficiencia biológica de Shiitake.

Tratamientos	AE	ST	BM	CHS	CSC	YA
Control	70%	30%				3%
T1	40%	20%		40%		3%
T2	60%		40%			3%
T3	40%	20%			40%	3%

Aserrín de encino (AE), salvado de trigo (ST), bagazo de malta (BM), cáscara de haba seca (CHS), cáscara de semilla de calabaza (CSC), yeso agrícola (YA).

3.3 Cultivo de *shiitake*

La formulación de los sustratos para el cultivo de shiitake fue llevada a cabo según lo establecido en el cuadro 5 y el proceso de preparación de los sustratos fue el siguiente: los sustratos fueron pesados y dispuestos en tinas de 40-50 L luego fueron mezclados manualmente con palas. Entonces las mezclas fueron hidratadas con agua corriente 1:1.8 m/v, con esta proporción fue obtenida una humedad del 70-80%. Después, 2.9 Kg del sustrato húmedo (70% de la capacidad de la mushbag, para permitir una colonización eficiente), sin llegar a escurrir, fue empacado en las mushbags y pasteurizado en una vaporera de 150 L a una temperatura promedio de 80- 90 °C durante 3.5 - 4.5 h. Luego, el sustrato pasteurizado y frío fue inoculado con la semilla (grano de maíz colonizado con micelio de shiitake FFU (unidad de filtro con ventilador) con un filtro HEPA H14 con una eficiencia del 99.9997 %, donde el área de trabajo (pisos, paredes, techo y mesa) fue desinfectada con hipoclorito al 6 %. Cada mushbag fue inoculada con el 10% de semilla con relación a su peso, después las mushbags, fueron selladas con una termo selladora marca fotgear, y se procedió a mezclar el sustrato con el inóculo para eficientizar su propagación.

Al término de la inoculación las mushbags fueron llevadas a la sala de incubación, con una humedad relativa del 70%, una temperatura de 20 - 24 °C y una concentración alta de CO₂ 800-1200 ppm, esto durante 2 - 3 semanas.

3.4 Fructificación, maduración y eficiencia biológica

La fructificación es consecuencia de una colonización eficiente de sustrato, que depende de las condiciones nutricionales y ambientales adecuadas para el crecimiento y desarrollo del micelio, que da origen al primordio. Así la fructificación fue inducida con condiciones ambientales de 18 - 22 °C, con una humedad relativa de 70-80 % y una concentración de CO₂ de 400-600 ppm, aquí las bolsas con el sustrato colonizado totalmente fueron colocadas en los estantes y abiertas por completo, dejando expuesto el bloque de sustrato invadido por el micelio; después de 5 días aparecieron los primordios, que 6 días más tarde alcanzaron la maduración (Figura. 7), los hongos fueron cosechados en su estado adulto, cuando el píleo estuvo totalmente extendido (Gaitan *et al.*, 2009), este fue

el momento idóneo para el corte de los cuerpos fructíferos; que fue realizado con una navaja previamente desinfectada, cortando desde la base de los cuerpos fructíferos. Finalmente, la cosecha de cada unidad experimental fue pesada.



Figura 7. Carpóforos jóvenes de Shiitake (izquierda) carpóforos maduros listos para cosechar (centro y derecha).

Un indicador clave en el cultivo de hongo es la eficiencia biológica que mide la relación entre la producción de hongos frescos y la cantidad de sustrato seco utilizado; se calcula con la ecuación:

$$Eficiencia\ biológica\ (EB) = \frac{\text{peso de hongos frescos}}{\text{peso de sustrato seco}} \times 100$$

Así, la EB fue determinada al primer y segundo corte, y manteniendo las condiciones constantes de humedad, temperatura y CO₂ durante todo el proceso de fructificación.

3.5 Extracción y cuantificación de lentinano

3.5.1 Extracción y purificación de lentinano

Los cuerpos fructíferos de *L. edodes* fueron deshidratados en un deshidratador eléctrico GIFOOS a 60 °C y molidos en una licuadora Royal Prestigue hasta obtener un polvo fino para aumentar la superficie de contacto en el proceso de extracción (Wu *et al.*, 2021). Se emplearon 6 g de hongo seco y molido adicionados a 900 mL de agua destilada a 90 °C con agitación constante en una parrilla de calentamiento con agitación CIMAREC

THERMOLYNE durante 1.5 hrs (dos veces) para disolver los polisacáridos; Este proceso permitió la solubilización de los β -glucanos sin degradar su estructura (Chen *et al.*, 2021). La solución resultante fue filtrada para eliminar residuos celulares. Posteriormente, los polisacáridos fueron precipitados mediante la adición de etanol a 4 °C (96 %) en una proporción de 1:4 v/v (solución: etanol) y se mantuvieron a 4 °C de 24 hrs. Esta precipitación ayudo a concentrar el lentinano y otros β -glucanos (Zhang *et al.*, 2018).

El extracto fue decantado y el precipitado fue sometido a sequedad en un horno al vacío scorpion cientific a 55 °C; el extracto seco (Wang *et al.*, 2017) fue usado para la cuantificación.

3.5.2 Cuantificación

25 mg de extracto crudo seco de cada tratamiento y repetición fueron suspendidos en 5 ml de agua destilada para obtener una concentración de 5mg/mL. Mientras que el rojo Congo fue suspendido en buffer de fosfatos pH 8 en una concentración de 25 μ g/mL (Nitschke *et al.*, 2011). La cuantificación de lentinano fue realizada espectrofotométricamente debido a que el rojo Congo interactúa con la triple hélice (enlaces b-1,3-1,6-glucanos) de la estructura del lentinano. La muestra para el análisis espectrofotométrico fue preparada mezclando 250 μ l del extracto suspendido en agua y 500 μ l de rojo congo (25 μ g/mL) en un tubo de ensayo de 5 mL, pasados 5 min la solución fue vertida a una celda de cuarzo para su lectura en espectrofotómetro spectronic SP133-60-01 a una λ de 510 nm (Jafari *et al.*, 2023).

La curva de calibración fue realizada usando esquizofilano como estándar de calibración con lecturas de la absorbancia a concentraciones de entre 150-50 μ g/ml con cinco puntos de calibración, la curva de calibración fue llevada a cabo por duplicado.

3.6 Análisis estadístico de los resultados obtenidos

Los datos obtenidos fueron analizados con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System, V8.0). Fue realizado un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la diferencia entre los tratamientos con respecto al tiempo requerido para la formación de

primordios, la eficiencia biológica en un primer y segundo corte y concentración de glucano β -(1-3)-(1-6) en el cuerpo fructífero de *L. edodes* con $P < 0.05$, luego fue realizada con una separación de medias por prueba Tukey para determinar el mejor tratamiento.

IV. Resultados

4.1 Aparición de primordios

El tiempo de aparición de primordios mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.001$), los mejores tratamientos fueron BM que presentó el menor tiempo promedio para aparición de primordios (36.75 ± 0.50 días) sin diferencia estadística con el control que registró 38.50 ± 0.58 días. En contraste, los tratamientos CHS y CSC desarrollaron primordios después de 43.50 ± 1.73 y 43.75 ± 0.96 días, respectivamente. Por lo tanto, BM y control fueron estadísticamente iguales, pero diferentes a CHS y CSC que no mostraron diferencia significativa entre sí.

4.2 Eficiencia biológica de 1er y 2do corte de *L. edodes* cultivado en diferentes sustratos

La eficiencia biológica (EB) fue registrada para dos cosechas como se muestra en la Figura 8. La EB al primer corte mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.0001$), así BM tuvo la mejor eficiencia biológica, seguido por el control y los tratamientos CSC Y CHS con los niveles de EB más bajos y sin diferencia significativa entre ellos. Al segundo corte la EB mostró un comportamiento similar al del primer corte, con la salvedad de que la magnitud disminuyó en 50% aproximadamente, de este modo BM fue el tratamiento de mayor EB, seguido del control y con menor eficiencia CSC y CHS, los valores de las EB para ambos cortes se muestran en la Figura 8.

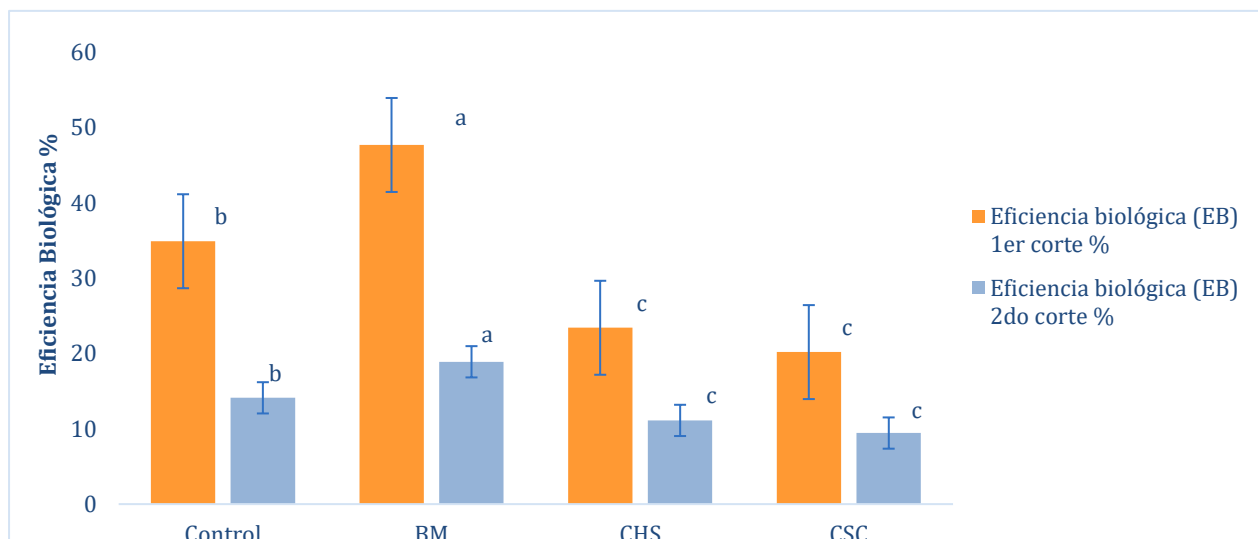


Figura 8. Eficiencia biológica de *L. edodes* a primer corte y segundo corte en los diferentes sustratos evaluados. Barras de error límite entre grupos, literales (a,b,c) grupos estadísticamente diferentes.

Los resultados obtenidos evidenciaron que BM alcanzó la mayor eficiencia biológica tanto en el primer corte que alcanzó 47.69 ± 1.06 %, como en el segundo con 18.9 ± 0.89 %, superando ampliamente al control que registró 34.91 ± 1.27 % y 14.12 ± 0.98 %, al primer y segundo corte, respectivamente; mientras que CHS en el primer corte obtuvo 23.42 ± 0.88 % y en el segundo corte consiguió un 11.12 ± 1.76 % y CSC 20.19 ± 0.75 % y 9.44 ± 1.39 % respectivamente.

4.3 Contenido de lentinano en cuerpos fructíferos de *L. edodes*, cultivados en diferentes sustratos

El contenido de β -(1-3) -(1-6)-glucanos cuantificado en los cuerpos fructíferos cosechados de los diferentes tratamientos está expresado como g lentinano/100 g de hongo seco en la Figura. 9, donde la concentración osciló entre 2.38 y 3.54, mostrando diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los sustratos de cultivo. Así, el tratamiento BM con 3.54 ± 0.39 fue el que mostró la mayor concentración de lentinano, seguido de los tratamientos CHS y CSC con 3.45 ± 0.56 y 3.03 ± 0.65 respectivamente, sin diferencia estadística entre ellos, aunque el control tuvo menor contenido de polisacárido, 2.38 ± 0.71 , fue estadísticamente igual al tratamiento CSC, pero diferente a BM.

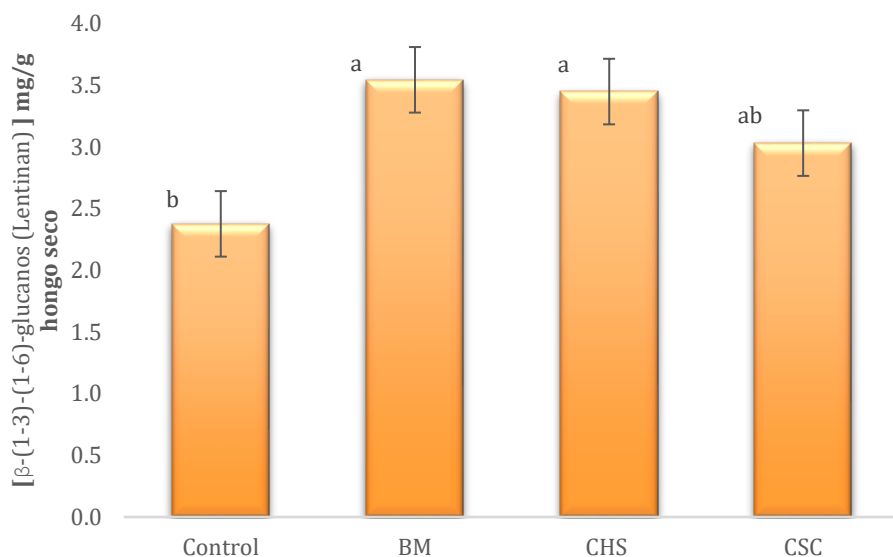


Figura 9. Concentración de β -(1-3) -(1-6)-glucanos (Lentinano) en cuerpos fructíferos de *L. edodes*. Barras de error límite entre grupos, literales (a,b,c) grupos estadísticamente diferentes.

V. Discusión de resultados

5.1 Colonización del sustrato y formación de primordios

La relación C/N del sustrato es un indicador para la colonización y formación de carpóforos, así los sustratos utilizados en este estudio muestran relaciones C/N para el control de 54, CSC de 45, CHS de 40 y BM de 36, por lo tanto CSC, CHS y BM son sustratos adecuados para el desarrollo micelial que según Chen (2005) es de 40, además que conforme se lleva a cabo la invasión de sustrato, hasta la aparición de primordios, esta relación disminuye de 7-14 puntos, lo que aumenta la concentración de nitrógeno que a su vez propicia el desarrollo de los cuerpos fructíferos (Saldaña y Valle, 2005), es así que se puede tomar esta relación como un factor importante para la aparición de primordios.

Por lo tanto, la aparición temprana de primordios en BM (37 días) es atribuible a las fuentes de carbono de rápida asimilación, como azúcares libres, almidón, y hemicelulosas presentes en el bagazo de malta (Mussatto *et al.*, 2006), mientras que, en el control, donde los primordios aparecieron a los 38 días, prevalecen celulosa, hemicelulosa y lignina (Apprich *et al.*, 2014; Bautista *et al.*, 2020), sustancias más complejas de degradar. Por otra parte, los sustratos CHS y CSC contienen factores anti nutricionales (FAN), entre los que destacan los taninos condensados, que generan complejos con las proteínas haciéndolas indisponibles y limitando así el nitrógeno para el hongo (Ivarsson *et al.*, 2021). Aunado a esto tanto la cáscara de haba como la semilla de calabaza contienen ácido fítico que quela minerales y limita su disponibilidad, además CHS contiene vicina y convicina, glicósidos pirimidínicos que inhiben enzimas metabólicas en hongos filamentosos (Pavlik *et al.*, 2011) esto nos permite inferir que la composición química y proximal del sustrato afecta directamente al tiempo de aparición de primordios, lo cual es un factor determinante en la industria de producción de hongos, pues un menor tiempo de producción implica una menor inversión de recursos y una mejor relación inversión beneficio. Por lo tanto, una adecuada formulación de sustrato tomando en cuenta azucares fácilmente asimilables, evitar FAN y un equilibrio adecuado en relación C/N permite disminuir los tiempos de aparición de primordios en el cultivo de Shiitake.

Los tiempos de aparición de primordios obtenidos en el presente estudio fueron considerablemente menores a los reportados por González *et al.* (2006), quienes registraron la formación de primordios a los 59 días de incubación utilizando sustratos formulados a base de planta de alfalfa, pulpa de café, cáscara de cacahuate y bagazo de caña, mientras que los tratamientos evaluados en esta investigación tuvieron tiempos de aparición comprendidos entre 37 días para BM y 44 días para CSC que son 37 y 26% menores en comparación a lo reportado por estos autores. Esta diferencia puede estar

asociada a las características físicas de los sustratos, mientras que González *et al.* (2006) señalaron que durante el proceso de incubación se presentó compactación del sustrato, condición que probablemente limitó la disponibilidad de oxígeno, que es una necesidad fisiológica para el crecimiento del micelio, en el caso de este estudio los diferentes sustratos no mostraron compactación y como se sabe una adecuada aireación favorece tanto la colonización micelial del sustrato como la transición a la etapa reproductiva, y la disminución del intercambio gaseoso retrasa la inducción de primordios (Leatham y Stahmann, 1987). Por lo tanto, aunque las diferencias en la composición química de los sustratos influyen en la respuesta productiva del hongo, los resultados sugieren que las propiedades físicas relacionadas con la aireación y la ausencia de compactación desempeñaron un papel determinante en la reducción del tiempo requerido para la aparición de primordios.

También los resultados obtenidos por Mata *et al.* (2020), muestran una diferencia mayor en el tiempo de aparición de primordios respecto a lo obtenido en esta investigación, que fue un 50.7% del tiempo que ellos reportan para la formación de primordios (75 días) aunque ellos utilizaron como sustrato una mezcla de aserrín, desecho de maíz, paja de trigo, turba y harina de soya y la incubación se llevó a cabo en bolsas sin filtros para intercambio gaseoso, condición que pudo limitar el oxígeno y favorecer la acumulación de dióxido de carbono dentro del sistema, en contraste los tratamientos evaluados en esta investigación fueron incubados en bolsas con filtros que facilitaron el intercambio gaseoso continuo, promoviendo condiciones más favorables para el desarrollo micelial y la diferenciación reproductiva, debido a que concentraciones elevadas de CO₂ retrasan la formación de primordios en *L. edodes*, debido a que esta etapa requiere una mayor disponibilidad de oxígeno asociada a los cambios fisiológicos que ocurren (Lee, *et al.*, 2012). Además de la naturaleza química de los materiales lignocelulósicos utilizados influye en la velocidad de desarrollo del micelio, los resultados obtenidos evidencian que las diferencias en la transferencia de oxígeno y la ventilación del sistema de cultivo son factores clave que favorecieron una aparición más temprana de primordios en el cultivo de *L. edodes*.

5.2 Eficiencia biológica de *L. edodes* cultivado en diferentes sustratos

La relación C/N del sustrato es un indicador para la colonización y formación de carpóforos y está directamente ligada a la EB del sistema, así los sustratos utilizados en este estudio mostraron relaciones C/N entre 54 y 36, adecuadas para el desarrollo micelial (Chen, *et al.* 2005) mientras que la relación C/N óptima para el desarrollo de carpóforos es de 25 (Desisa *et al.*, 2023), considerando que el desarrollo micelial disminuye la concentración de carbono, es claro que los sustratos colonizados por los micelios tienen una relación C/N próxima a el valor adecuado para la fructificación, por lo tanto el tratamiento BM que se acerca más a 25 y es el que presenta una EB mayor.

Sin embargo, tomando en cuenta este hecho se esperaba que el tratamiento CHS mostrará una EB cercana a BM, pero cabe destacar que aunque la relación C/N es un factor importante para la EB no es el único que determina la EB, esto queda de manifiesto con los sustratos CHS y CSC, que con una relación C/N dentro de los parámetros adecuados para el cultivo de shiitake al contener factores anti nutricionales (FAN), entre los que destacan los taninos condensados (Ivarsson *et al.*, 2021), ácido fítico, además CHS contiene vicina y convicina (Pavlík *et al.*, 2011); que repercuten directamente en la formación de carpóforos disminuyendo su EB.

Otro factor a considerar es la capacidad de retención de agua en el bloque del sustrato a lo largo de todo el cultivo, desde la inoculación hasta la cosecha, la humedad favorece una mayor producción y desarrollo de carpóforos, en este caso el sustrato con mayor capacidad de retención de agua fue el bagazo de malta, mientras que CHS y CSC al ser sustratos con una cantidad mayor de fibra en su composición (Hussain *et al.*, 2022) respecto al control y BM, la absorción de humedad del ambiente fue limitada y fueron susceptibles a la desecación, esto se traduce en una producción menor de cuerpos fructíferos (Salmones *et al.*, 1999) afectando directamente la EB en estos dos tratamientos.

Los resultados obtenidos evidencian que la eficiencia biológica en *L. edodes* depende de la interacción entre factores nutricionales y físicos del sustrato. Aunque una relación C/N adecuada favorece la formación de carpóforos, la presencia de factores antinutricionales y una baja capacidad de retención de agua pueden limitar significativamente la productividad, como se observó en los tratamientos CHS y CSC. En contraste, el tratamiento BM presentó las condiciones más favorables para el desarrollo y producción de cuerpos fructíferos, reflejándose en una mayor EB. Lo anterior demuestra que la selección de sustratos debe considerar no solo su composición química, sino también sus propiedades físicas para optimizar el rendimiento del cultivo. En este contexto, la eficiencia biológica constituye uno de los indicadores más importantes en la industria de producción de hongos comestibles, ya que está directamente relacionada con la capacidad de transformar el sustrato en biomasa comercializable, impactando de manera directa la rentabilidad del proceso y la viabilidad económica de los sistemas de producción.

5.3 Efecto de la formulación del sustrato sobre el contenido de lentinano en carpóforos de Shiitake

Los β -glucanos son sintetizados a partir de monómeros de glucosa activada (por ej. UDP-glucosa), derivada de la hidrólisis de polisacáridos del sustrato (Douglas, 2001;

Papaspyridi *et al.*, 2018). De tal modo que sí el sustrato tiene componentes fácilmente degradables por la maquinaria enzimática del hongo, que, en el caso de shiitake, un hongo de la pudrición blanca, que degrada sin dificultad celulosa, hemicelulosa y lignina, acelera su crecimiento y la síntesis de compuestos bioactivos (Papaspyridi *et al.*, 2018). Por lo tanto, la composición y naturaleza del sustrato juegan un papel determinante en la biosíntesis de polisacáridos, en este caso los β -glucanos de *L. edodes* (Papaspyridi *et al.*, 2018), debido a esto, la concentración de lentinano tuvo diferencias significativas entre los tratamientos, y al parecer BM posee el balance nutricional que favorece la ruta de biosíntesis de lentinano.

Además, la actividad de la β -1,3-glucano sintasa, enzima responsable de unir las unidades de glucosa activada durante la biosíntesis de la pared celular y de β -glucanos en hongos de la pudrición blanca (Papaspyridi *et al.*, 2018), es inducida por la presencia de compuestos fenólicos en los sustratos (Reverberi *et al.*, 2004), esto es congruente con el aumento en la concentración de lentinano en los carpóforos provenientes de los sustratos CHS, CSC y BM; debido a que ambos sustratos contienen compuestos fenólicos (Zehireva, 2023; Mukherjee *et al.*, 2025) que generan un estrés oxidativo y actúa como señal fisiológica promoviendo la activación de genes implicados en la defensa celular y en la síntesis de polisacáridos (Cortina-Escribano *et al.*, 2020). Además, en BM están presentes compuestos fenólicos, en proporción mayor del subgrupo de los ácidos hidroxicinámicos como ácido p-cumárico, ferúlico, sinápico y cafeico respectivamente, que se encuentran presentes en la pared celular del bagazo; y en menor concentración los ácidos hidroxibenzoicos, siríngico, protocatecuico, *p*-hidroxibenzoico y vainílico (Saberian *et al.*, 2024), debido a esto, el BM pudo favorecer la producción de lentinano sin comprometer la eficiencia biológica. Este fenómeno coincide con reportes que vinculan la presencia de compuestos fenólicos con el aumento de β -glucanos en *L. edodes* esto debido a la estimulación del ARNm y la proteína de la β -1-3-glucano sintasa (Reverberi *et al.*, 2004).

De acuerdo con los resultados obtenidos, el tratamiento BM logró los índices más altos tanto en la eficiencia biológica como en la concentración de lentinano, confirmando así la estrecha relación entre estos dos parámetros para este tratamiento. Por lo tanto, este residuo de la industria cervecera es una opción factible para reducir costos de producción en el cultivo de shiitake y darle más accesibilidad al consumidor final de adquirir este alimento funcional para incluirlo en su dieta. Asimismo, la selección estratégica de sustratos suplementados con residuos agroindustriales es una alternativa viable para su valorización y una herramienta para incrementar el valor funcional y comercial de los cuerpos fructíferos de Shiitake.

En conjunto, los resultados sugieren que la composición del sustrato influyó directamente en la acumulación de lentinano en los carpóforos de *L. edodes*, al modificar tanto la

disponibilidad de precursores carbonados como las condiciones fisiológicas asociadas a su biosíntesis. La superioridad observada en los tratamientos suplementados con bagazo de malta, cáscara de haba seca y cáscara de semilla de calabaza indica que estos materiales aportaron mayor disponibilidad de compuestos fácilmente asimilables y la presencia de compuestos fenólicos capaces de inducir respuestas metabólicas relacionadas con la síntesis de β -glucanos.

VI. Conclusión

La presente investigación demostró que la composición química del sustrato de cultivo influye directamente en la concentración de lentinano en los cuerpos fructíferos de *L. edodes*, y que el tratamiento suplementado con bagazo de malta fue el mejor, al registrar el menor tiempo de aparición de primordios, la mayor eficiencia biológica en ambos cortes y la concentración más alta de lentinano.

VII. Referencias

- Apprich, S., Tirpanalan, Ö., Hell, J., Reisinger, M., Böhmendorfer, S., Siebenhandl-Ehn, S., Novalin, S., y Kneifel, W. (2014). Wheat bran-based biorefinery 2: Valorization of products. *LWT - Food Science and Technology*, 56(2), 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.003>
- Ahmad, I., Arif, M., Mimi, X., Zhang, J., Ding, Y., y Lyu, F. (2023). Therapeutic values and nutraceutical properties of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*): A review. *Trends in Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.007>
- Bakratsas, G., Polydera, A., Katapodis, P. y Stamatis, H. (2021). Recent trends in submerged cultivation of mushrooms and their application as a source of nutraceuticals and food additives. *Future Foods*, 4, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100086>
- Bautista Hernández, R., y Honorato Salazar J. A. (2020). COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DE CUATRO ESPECIES DEL GÉNERO *Quercus*. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales* 30 (98). México, ME:25-49.
<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/853>
- Beelman, R.B., Kalaras, M.D., Phillips, A.T. y Locke, K.G. (2022) 'Health consequences of improving the content of ergothioneine in the food supply', *FEBS Letters*, 596(10), pp. 1297–1308. <https://doi.org/10.1002/1873-3468.14268>
- Bernabé-González, T., Mata, G., Cayetano-Catarino, M. y Gutiérrez Reyes, G. (2006) 'Cultivo experimental del hongo shiitake, *Lentinula edodes*, sobre dos subproductos agrícolas en Guerrero, México', *Revista Mexicana de Micología*, 23, pp. 63–68. Xalapa, México: Sociedad Mexicana de Micología.
- Bobek, P., Ginter, E., Jurčovičová, M. y Kuniak, L. (1991). Cholesterol-lowering effect of the mushroom *Pleurotus ostreatus* in hereditary hypercholesterolemic rats. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 35(4), 191–195. <https://doi.org/10.1159/000177644>
- Budihardjo, M.A., Ramadan, B.S., Yohana, E., Syafrudin, Rahmawati, F., Ardiana, R., Susilo, D.B., Ikhlas, N. y Karmilia, A. (2021) 'A review of anaerobic landfill bioreactor using leachate recirculation to increase methane gas recovery', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 894(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/894/1/012013>
- Byron, D.-R., José, R.M.-S., Felipe, R.R., Kelly, M.V.J. y Dagoberto, C. (2018). Enhancement of eritadenine production using three carbon sources. *African Journal of Food Science*, 12(12), 374–382. <https://doi.org/10.5897/ajfs2017.1654>

Calabaza una dulce tradición. (2020, 31 de octubre).

gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/calabazas-una-dulce-tradicion?idiom=es>

Camilleri, E., Blundell, R., Karpiński, T.M., Panda, J., Nath, P.C., Mohanta, Y.K., Aruci, E. y Atrooz, O.M. (2025) The therapeutic potential of Shiitake Mushrooms (*Lentinula edodes*). 2, artículo 100632. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100632>

Cardwell, G., Bornman, J., James, A. y Black, L. (2018). A review of mushrooms as a potential source of dietary vitamin D. *Nutrients*, 10(10), 1498. <https://doi.org/10.3390/nu10101498>

Chaturvedi, V. K., Agarwal, S., Gupta, K. K., Ramteke, P. W., y Singh, M. P. (2018). Medicinal mushroom: boon for therapeutic applications. 3 *Biotech*, 8(8). <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1358-0>

Chen, H., Mao, Y., Zhou, J., Zhang, C., y Du, J. (2026). Valorizing plant biomass residues through edible mushroom mycelial fermentation: From bioconversion to bioactive recovery and direct mycelium utilization in novel foods. *Trends in Food Science & Technology*, 105965. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.105965>

Cheung, P.C.K. (2010). The nutritional and health benefits of mushrooms. *Nutrition Bulletin*, 35(4), 292–299. <https://doi.org/10.1111/j.1467-3010.2010.01859.x>

Conociendo la Industria de la cerveza. (s.f.). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). https://www.inegi.org.mx/tablerosestadisticos/industria_cerveza/

Desisa, B., Muleta, D., Dejene, T., Jida, M., Goshu, A. y Martin-Pinto, P. (2023) ‘Substrate Optimization for Shiitake (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler) Mushroom Production in Ethiopia’, *Journal of Fungi*, 9(8), p. 811. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/jof9080811>

de Souza, D.F., da Silva, M.C.S., de Souza, T.C., Rocha, G.C., Kasuya, M.C.M. y Eller, M.R. (2023) ‘Effect of Selenium-Enriched Substrate on the Chemical Composition, Mineral Bioavailability, and Yield of Edible Mushrooms’, *Biological Trace Element Research*, 201, pp. 3077–3087. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03396-z>

Dong, Y., Miao, R., Feng, R., Wang, T., Yan, J., Zhao, X., Han, X., Gan, Y., Lin, J., Li, Y., Gan, B., y Zhao, J. (2022). Edible and medicinal fungi breeding techniques, a review: Current status and future prospects. *Current Research in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.09.002>

Douglas, C.M. (2001). Fungal $\beta(1,3)$ -D-glucan synthesis. *Medical Mycology*, 39(1), 55–66.

- Du, B., Meenu, M., Liu, H. y Xu, B. (2019). Molecular structure and function relationship of β -glucan. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(16), 4032.
- FAO (2021). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Friedman, M. (2016). Mushroom polysaccharides. *Foods*, 5(4), 80.
- Gaitán-Hernández, R., Salmones, D., Pérez Merlo, R. y Mata, G. (2009) 'Evaluación de la eficiencia biológica de cepas de *Pleurotus pulmonarius* en paja de cebada fermentada', *Revista Mexicana de Micología*, 30, pp. 63–71.
- Grimm, D. y Wösten, H.A.B. (2018). Mushroom cultivation in the circular economy. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 7795–7803.
- Guillamón, E., García-Lafuente, A., Lozano, M., D'Arrigo, M., Rostagno, M. A., Villares, A., y Martínez, J. A. (2010). Edible mushrooms: Role in the prevention of cardiovascular diseases. *Fitoterapia*, 81(7), 715–723. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2010.06.005>
- Ha, B., Moon, Y.J., Song, Y., Kim, S., Kim, M., Yoon, C.W. and Ro, H.S. (2019) 'Molecular analysis of B mating type diversity in *Lentinula edodes*', *Scientia Horticulturae*, 243, pp. 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.009>
- Habtemariam, S. (2020). *Trametes versicolor* polysaccharides in cancer therapy. *Biomedicines*, 8(5), 135.
- Halliwell, B. (2012). Free radicals and antioxidants. *Nutrition Reviews*, 70(5), 257–265.
- Han, B., Baruah, K., Cox, E., Vanrompay, D., y Bossier, P. (2020). Structure-Functional Activity Relationship of β -Glucans From the Perspective of Immunomodulation: A Mini-Review. *Frontiers in Immunology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.00658>
- Hatakka, A. y Hammel, K.E. (2010). Fungal biodegradation of lignocelluloses. *Industrial Applications*, 10(2), 319–340.
- Herman, K.C. y Bleichrodt, R.J. (2025) 'Cultivation methods and biology of *Lentinula edodes*', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 109, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13387-w>
- Huang, X., Zhang, R., Yang, Q., Li, X., Xiang, Q., Zhao, K., Ma, M., Yu, X., Chen, Q., Zeng, X., Zhang, L., Penttinen, P. y Gu, Y. (2022) 'Cultivating *Lentinula edodes* on substrate containing composted sawdust affects the expression of carbohydrate and aromatic amino acid

metabolism-related genes', *mSystems*, 7(1), e00827-21.

<https://doi.org/10.1128/msystems.00827-21>

Huang, Y. y Zambonelli, A. (2024) 'Status and prospects of research on edible fungi protoplast fusion technology', *Italian Journal of Mycology*, 53, pp. 1–15. <https://doi.org/10.6092/issn.2531-7342/19476>

Hu, D., Yang, X., Hu, C., Feng, Z., Chen, W. y Shi, H. (2021) 'Comparison of ergosterol and vitamin D₂ in mushrooms *Agaricus bisporus* and *Cordyceps militaris* using ultraviolet irradiation directly on dry powder or in ethanol suspension', *ACS Omega*, 6(44), pp. 29506–29515. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03561>

Hu, S., Xu, X., *et al.* (2024) 'Steady and transient rheological properties of four polysaccharides with different chain conformations', *Journal of Polymer Science*, pp. 364–374. <https://doi.org/10.1002/pol.20230429>

Hussain, R., Ahmed, M., Khan, T. A., y Akhter, Y. (2019). Fungal P450 monooxygenases - the diversity in catalysis and their promising roles in biocontrol activity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(3), 989–999. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10305-3>

Ivarsson, E., Grudén, M., Södergren, J., y Hultberg, M. (2021). Use of faba bean (*Vicia faba* L.) hulls as substrate for *Pleurotus ostreatus* – Potential for combined mushroom and feed production. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127969. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127969>

Jafari, M., Boskabady, MH, Rezaee, SA, Rezaeian, S., Behrooz, S., Ramezannejad, R., Pourianfar, H. Reza (2023). 'El extracto de lentinano y β -glucano del hongo shiitake, *Lentinula edodes*, alivia los cambios hematológicos agudos inducidos por LPS en ratones', *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 26(7), pp. 836-842. doi: 10.22038/ijbms.2023.67669.14820

Kalač, P. (2009). Chemical composition of wild mushrooms. *Food Chemistry*, 113(1), 9–16.

Kalaras, M. D., Richie, J. P., Calcagnotto, A., y Beelman, R. B. (2017). Mushrooms: A rich source of the antioxidants ergothioneine and glutathione. *Food Chemistry*, 233, 429–433. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.109>

Kour, H., Kour, D., Kour, S., Singh, S., Jawad Hashmi, S. A., Yadav, A. N., Kumar, K., Sharma, Y. P., y Ahluwalia, A. S. (2022). Bioactive compounds from mushrooms: An emerging bioresources of food and nutraceuticals. *Food Bioscience*, 102124. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102124>

- Kunhorm, P., Chueaphromsri, P., Chaicharoenaudomrung, N., y Noisa, P. (2022). Enhancement of cordycepin production from *Cordyceps militaris* culture by epigenetic modification. *Biotechnology Letters*. <https://doi.org/10.1007/s10529-022-03241-2>
- Leatham, G. F., y Stahmann, M. A. (1987). *Effect of light and aeration on fruiting of Lentinula edodes*. Transactions of the British Mycological Society, 88(1), 9–20. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(87\)80180-8](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(87)80180-8)
- Lee, H. Y., Ham, E. J., Yoo, Y. J., Kim, E. S., Shim, K. K., Kim, M. K., y Koo, C. D. (2012). *Effects of Aeration of Sawdust Cultivation Bags on Hyphal Growth of Lentinula edodes*. Mycobiology, 40(3), 164–167. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2012.40.3.164>
- Losoya-Sifuentes, C., Cruz, M., Rocha-Pizaña, M.R., Loredó-Treviño, A. y Belmares, R. (2025) 'Edible Mushrooms: a Nutrient-Rich Ingredient for Healthier Food Products – A Review', *Current Nutrition Reports*, 14(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s13668-024-00605-0>
- Lynch, K. M., Steffen, E. J., y Arendt, E. K. (2016). Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *Journal of the Institute of Brewing*, 122(4), 553–568. <https://doi.org/10.1002/jib.363>
- Lynch, M., Ackerman, M.S., Gout, J.F., Long, H., Sung, W., Thomas, W.K. y Foster, P.L. (2016) 'Genetic drift, selection and the evolution of the mutation rate', *Nature Reviews Genetics*, 17(11), pp. 704–714. <https://doi.org/10.1038/nrg.2016.104>
- Massironi, A., Biella, S., de Moura Pereira, P. F., Scibona, F., Feni, L., Sindaco, M., Emide, D., Jiménez-Quero, A., Bianchi, C. L. M., Verotta, L., y Marzorati, S. (2023). Valorization of pumpkin seed hulls, cucurbitin extraction strategies and their comparative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 427, 139267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139267>
- Mata, G., Gaitán-Hernández, R. y Salmenes, D. (2020) *El cultivo del shiitake: tecnología e innovación en la producción de un alimento y medicina ancestral*. Xalapa, México: Instituto de Ecología, A.C. 78 pp.
- Mussatto, S. I., Dragone, G., y Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
- Mwangi, R. W., Macharia, J. M., Wagara, I. N., y Bence, R. L. (2022). The antioxidant potential of different edible and medicinal mushrooms. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 147, 112621. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.112621>
- Narvaez, L.C., Bolaños Rojas, A.C., Chaurra Arboleda, A.M. y Zúñiga Escobar, O. (2022) 'Changes in macronutrients and physical properties during the growth of *Lentinula edodes* and *Pleurotus ostreatus* in a compost based on sugarcane bagasse agricultural waste', *Chilean*

Journal of Agricultural & Animal Sciences, 37(3), pp. 1–12. <https://doi.org/10.29393/CHJAAS37-31CMLO40031>

Ozcelik, E., y Peksen, A. (2007). Hazelnut husk as a substrate for the cultivation of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*). *Bioresource Technology*, 98(14), 2652–2658. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.020>

Papoutsis, K., Edelenbos, M., Løkke, M.M., Deleuran, L.C. y Koutelidakis, A.E. (2021) 'Fruit, vegetables, and mushrooms for the preparation of extracts with α -amylase and α -glucosidase inhibition properties: A review', *Food Chemistry*, 363, 130269. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130269>

Patel, S. y Goyal, A. (2011). Mushrooms as anti-cancer therapeutics. *3 Biotech*, 2(1), 1–15.

Pavlík, M., Váňová, M., Laudová, V., y Harmatha, J. (2011). Fungitoxicity of natural heterocycle glucoside vicine obtained from *Vicia faba* L. against selected microscopic filamentous fungi. *Plant, Soil and Environment*, 48(No. 12), 543–547. <https://doi.org/10.17221/4410-pse>

Producción Agrícola. (2025, 28 de julio).

gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/produccion-agricola-404122>

Rahi, D.K. y Malik, D. (2016). Diversity of mushrooms. *The Journal of Mycology*, 2016, 7654123.

Rathore, H., Prasad, S. y Sharma, S. (2017). Mushroom nutraceuticals. *PharmaNutrition*, 5(2), 35–46.

Reverberi, M., Di Mario, F. y Tomati, U. Inducción de la β -glucano sintasa en setas cultivadas en aguas residuales de almazara. *Appl Microbiol Biotechnol* 66, 217–225 (2004). <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1662-y>

Roupas, P., Keogh, J., Noakes, M., Margetts, C., y Taylor, P. (2012). The role of edible mushrooms in health: Evaluation of the evidence. *Journal of Functional Foods*, 4(4), 687–709. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.05.003>

Saldaña, A.H.G. y Valle, M.C.E. (2005) *Efecto de la composición química del sustrato sobre la producción de Lentinula edodes*.

Saberian, H., Yazdi, A. P. G., Nejatian, M., Bazsefidpar, N., Mohammadian, A. H., Rahmati, M., Assadpour, E., y Jafari, S. M. (2024). Brewers' spent grain as a functional ingredient in bakery, pasta, and cereal-based products. *Future Foods*, 100479. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100479>

Safaie, N., Salehi, M., Farhadi, S., Aligholizadeh, A. y Mahdizadeh, V. (2024) 'Lentinula edodes substrate formulation using multilayer perceptron-genetic algorithm: a critical production checkpoint', *Frontiers in Microbiology*, 15, 1366264. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1366264>

Scholtmeijer, K., van den Broek, L.A.M., Fischer, A.R.H. y van Peer, A. (2023) 'Potential Protein Production from Lignocellulosic Materials Using Edible Mushroom Forming Fungi', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(11), pp. 4450–4457. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c08828>

Shaher, F., Wang, S., Qiu, H., Hu, Y., Zhang, Y., Wang, W., Al-Ward, H., Abdulghani, M. A. M., Baldi, S., y Zhou, S. (2020). Effect and Mechanism of *Ganoderma lucidum* Spores on Alleviation of Diabetic Cardiomyopathy in a Pilot in vivo Study. *Diabetes, metabolic syndrome and obesity : targets and therapy*, 13, 4809–4822. <https://doi.org/10.2147/DMSO.S281527>

Shamim, M. Z., Mishra, A. K., Kausar, T., Mahanta, S., Sarma, B., Kumar, V., Mishra, P. K., Panda, J., Baek, K.-H., y Mohanta, Y. K. (2023). Exploring Edible Mushrooms for Diabetes: Unveiling Their Role in Prevention and Treatment. *Molecules*, 28(6), 2837. <https://doi.org/10.3390/molecules28062837>

Singh nee' Nigam, P., y Pandey, A. (Eds.). (2009). *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7>

Song, X., Shang, X., Zhang, M., Yu, H., Zhang, D., Tan, Q. et al. (2025) 'Cultivation methods and biology of *Lentinula edodes*', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 109, 63. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13387-w>

Stamets, P. (2006). Can mushrooms help save the world? *Explore*, 2(2), 152–161.

Trivedi, S., Patel, K., Belgamwar, V., y Wadher, K. (2022). Functional polysaccharide lentinan: Role in anti-cancer therapies and management of carcinomas. *Pharmacological Research - Modern Chinese Medicine*, 2, 100045. <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2022.100045>

Uffelman, C. N., Chan, N. I., Davis, E. M., Wang, Y., McGowan, B. S., y Campbell, W. W. (2023). An Assessment of Mushroom Consumption on Cardiometabolic Disease Risk Factors and Morbidities in Humans: A Systematic Review. *Nutrients*, 15(5), 1079. <https://doi.org/10.3390/nu15051079>

Valverde, M. E., Hernández-Pérez, T., y Paredes-López, O. (2015). Edible Mushrooms: Improving Human Health and Promoting Quality Life. *International Journal of Microbiology*, 2015, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2015/376387>

Wang, M., Pan, J., Xiang, W., You, Z., Zhang, Y., Wang, J., y Zhang, A. (2024). β -glucan: a potent adjuvant in immunotherapy for digestive tract tumors. *Frontiers in Immunology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1424261>

Wang, Q., Sheng, X., Shi, A., Hu, H., Yang, Y., Liu, L., Fei, L., y Liu, H. (2017). β -Glucans: Relationships between Modification, Conformation and Functional Activities. *Molecules*, 22(2), 257. <https://doi.org/10.3390/molecules22020257>

Wasser, S. (2014). Medicinal mushroom science. *Biomedical Journal*, 37(6), 345.

Weigand-Heller, A. J., Kris-Etherton, P. M., y Beelman, R. B. (2012). The bioavailability of ergothioneine from mushrooms (*Agaricus bisporus*) and the acute effects on antioxidant capacity and biomarkers of inflammation. *Preventive Medicine*, 54, S75—S78. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2011.12.028>

Yang, W., Guo, F., y Wan, Z. (2013). Yield and size of oyster mushroom grown on rice/wheat straw basal substrate supplemented with cotton seed hull. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(4), 333–338. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.02.006>

Zhao, Q., Jiang, Y., Zhao, Q., Manzi, H.P., Su, L., Liu, D., Huang, X., Long, D., Tang, Z. and Zhang, Y. (2023) 'The benefits of edible mushroom polysaccharides for health and their influence on gut microbiota: a review', *Frontiers in Nutrition*, 10, 1213010. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1213010>

VIII. Anexo

Análisis Estadístico

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 1

Procedimiento GLM

Información del nivel de clase

Clase Niveles Valores
Tratamiento 4 BM CHS CSC Control
Número de observaciones 16

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 2

Procedimiento GLM

Variable dependiente: Lentinano

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	3.37386875	1.12462292	4.07	0.0329
Error	12	3.31482500	0.27623542		
Total correcto	15	6.68869375			
R-cuadrado		Coef Var	Raiz MSE	Lentinano Media	
	0.504414	16.95765	0.525581	3.099375	

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	3.37386875	1.12462292	4.07	0.0329

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	3.37386875	1.12462292	4.07	0.0329

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 3

Procedimiento GLM

Variable dependiente: EB1

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	2170.171725	723.390575	331.31	<.0001
Error	12	26.200850	2.183404		
Total correcto	15	2196.372575			
R-cuadrado		Coef Var	Raiz MSE	EB1 Media	
	0.988071	3.993202	1.477635	37.00375	

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	2170.171725	723.390575	331.31	<.0001

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	2170.171725	723.390575	331.31	<.0001

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 4

Procedimiento GLM

Variable dependiente: EB2

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
--------	----	-------------------	----------------------	---------	--------

Modelo	3	851.0193500	283.6731167	80.18	<.0001
Error	12	42.4561500	3.5380125		
Total correcto	15	893.4755000			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	EB2 Media
0.952482	11.09548	1.880961	16.95250

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	851.0193500	283.6731167	80.18	<.0001

Cuadrado de

Fuente	DF	Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	851.0193500	283.6731167	80.18	<.0001

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 5

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Lentinano

NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un

índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.

Alfa 0.05

Error de grados de libertad 12

Error de cuadrado medio 0.276235

Valor crítico del rango estudentizado 4.19852

Diferencia significativa mínima 1.1033

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	Tratamiento
--------------------	-------	---	-------------

A	3.5425	4	BM
---	--------	---	----

A

B	A	3.4475	4	CHS
---	---	--------	---	-----

B

B	A	3.0300	4	CSC
---	---	--------	---	-----

B

B	2.3775	4	Control
---	--------	---	---------

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 6

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para EB1

NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un

índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.

Alfa 0.05

Error de grados de libertad 12

Error de cuadrado medio 2.183404

Valor crítico del rango estudentizado 4.19852

Diferencia significativa mínima 3.1019

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	Tratamiento
--------------------	-------	---	-------------

A	55.905	4	BM
---	--------	---	----

B	37.208	4	Control
---	--------	---	---------

C	28.623	4	CSC
---	--------	---	-----

C 26.280 4 CHS
Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 7
 Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para EB2

NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un

índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.

Alfa 0.05
 Error de grados de libertad 12
 Error de cuadrado medio 3.538012
 Valor crítico del rango estudentizado 4.19852
 Diferencia significativa mínima 3.9486

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	Tratamiento
A	28.983	4	BM
B	16.468	4	Control
C	11.940	4	CSC
C	10.420	4	CHS

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 8
 Procedimiento GLM

Medias de cuadrados mínimos

Ajuste para comparaciones múltiples: Tukey

Tratamiento	LSMEAN	Número
BM	3.54250000	1
CHS	3.44750000	2
CSC	3.03000000	3
Control	2.37750000	4

Medias de cuadrados mínimos para el efecto Tratamiento

Pr > |t| for H0: LSMean(i)=LSMean(j)

Variable dependiente: Lentinano

i/j	1	2	3	4
1		0.9938	0.5346	0.0375
2	0.9938		0.6828	0.0584
3	0.5346	0.6828		0.3395
4	0.0375	0.0584	0.3395	

Lentinano

Tratamiento	LSMEAN	95% Límites de confianza	
BM	3.542500	2.969929	4.115071
CHS	3.447500	2.874929	4.020071
CSC	3.030000	2.457429	3.602571
Control	2.377500	1.804929	2.950071

Medias de mínimos cuadrados

para el efecto Tratamiento

Simultáneo 95% Confidence

i	j	Diferencia entre medias	Limits for LSMean(i)-LSMean(j)
1	2		
1	3		
1	4		
2	3		
2	4		
3	4		

1	2	0.095000	-1.008332	1.198332
1	3	0.512500	-0.590832	1.615832
1	4	1.165000	0.061668	2.268332
2	3	0.417500	-0.685832	1.520832
2	4	1.070000	-0.033332	2.173332
3	4	0.652500	-0.450832	1.755832

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 9

Procedimiento GLM

Medias de cuadrados mínimos

Ajuste para comparaciones múltiples: Tukey

Número

Tratamiento	EB1 LSMEAN	LSMEAN
BM	55.9050000	1
CHS	26.2800000	2
CSC	28.6225000	3
Control	37.2075000	4

Medias de cuadrados mínimos para el efecto Tratamiento

Pr > |t| for H0: LSMean(i)=LSMean(j)

Variable dependiente: EB1

i/j	1	2	3	4
1		<.0001	<.0001	<.0001
2	<.0001		0.1671	<.0001
3	<.0001	0.1671		<.0001
4	<.0001	<.0001	<.0001	

Tratamiento	EB1 LSMEAN	95% Límites de confianza
BM	55.905000	54.295255 57.514745
CHS	26.280000	24.670255 27.889745
CSC	28.622500	27.012755 30.232245
Control	37.207500	35.597755 38.817245

Medias de mínimos cuadrados

para el efecto Tratamiento

Simultáneo 95% Confidence

i	j	Diferencia entre medias	Limits for LSMean(i)-LSMean(j)
1	2	29.625000	26.523059 32.726941
1	3	27.282500	24.180559 30.384441
1	4	18.697500	15.595559 21.799441
2	3	-2.342500	-5.444441 0.759441
2	4	-10.927500	-14.029441 -7.825559
3	4	-8.585000	-11.686941 -5.483059

Número

Tratamiento	EB2 LSMEAN	LSMEAN
BM	28.9825000	1
CHS	10.4200000	2

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 10

Procedimiento GLM

Medias de cuadrados mínimos

Ajuste para comparaciones múltiples: Tukey

Tratamiento	Número	EB2 LSMEAN	LSMEAN
CSC	11.9400000	3	
Control	16.4675000	4	

Medias de cuadrados mínimos para el efecto Tratamiento

Pr > |t| for H0: LSMean(i)=LSMean(j)

Variable dependiente: EB2

i/j	1	2	3	4
1		<.0001	<.0001	<.0001
2	<.0001		0.6716	0.0032
3	<.0001	0.6716		0.0234
4	<.0001	0.0032	0.0234	

Tratamiento	EB2 LSMEAN	95% Límites de confianza
BM	28.982500	26.933370 31.031630
CHS	10.420000	8.370870 12.469130
CSC	11.940000	9.890870 13.989130
Control	16.467500	14.418370 18.516630

Medias de mínimos cuadrados
para el efecto Tratamiento

Simultáneo 95% Confidence

i	j	Diferencia entre medias	Limits for LSMean(i)-LSMean(j)
1	2	18.562500	14.613872 22.511128
1	3	17.042500	13.093872 20.991128
1	4	12.515000	8.566372 16.463628
2	3	-1.520000	-5.468628 2.428628
2	4	-6.047500	-9.996128 -2.098872
3	4	-4.527500	-8.476128 -0.578872

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 11

Procedimiento CORR

3 Variables: Lentinano EB1 EB2

Estadísticos simples

Desviación

Variable	N	Media	típica	Suma	Mínimo	Máximo
Lentinano	16	3.09938	0.66777	49.59000	1.49000	3.98000
EB1	16	37.00375	12.10061	592.06000	25.77000	57.91000
EB2	16	16.95250	7.71784	271.24000	8.84000	31.32000

Coefficientes de correlación Pearson, N = 16

Prob > |r| suponiendo H0: Rho=0

	Lentinano	EB1	EB2
Lentinano	1.00000	0.18483	0.20081
		0.4932	0.4558
EB1	0.18483	1.00000	0.94940
	0.4932		<.0001
EB2	0.20081	0.94940	1.00000
	0.4558	<.0001	

Sistema SAS 00:51 Saturday, January 23, 2001 12

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: Lentinano

Analysis of Variance

	Sum of	Mean		
Fuente	DF	Squares	Square	F-Valor Pr > F
Modelo	2	0.27201	0.13601	0.28 0.7635
Error	13	6.41668	0.49359	
Total corregido	15	6.68869		
Root MSE		0.70256	R-cuadrado	0.0407
Media dependiente		3.09938	Adj R-Sq	-0.1069
Coeff Var		22.66781		

Parámetros estimados

Variable	DF	Estimate	Error	Valor t	Pr > t
Término i	1	2.84315	0.71077	4.00	0.0015
EB1pendie	1	-0.00326	0.04773	-0.07	0.9467
EB2	1	0.02222	0.07484	0.30	0.7712

Sistema SAS 00:23 Friday, January 1, 2001 36

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: EBT

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	3327.117425	1109.039142	656.48	<.0001
Error	12	20.272350	1.689363		
Total correcto	15	3347.389775			
R-cuadrado		Coef Var	Raiz MSE	EBT Media	
	0.993944	2.890673	1.299755	44.96375	

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
tratamiento	3	3327.117425	1109.039142	656.48	<.0001

Sistema SAS 00:23 Friday, January 1, 2001 39

Procedimiento ANOVA

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para EBT

NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un

índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.

Alfa 0.05

Error de grados de libertad 12

Error de cuadrado medio 1.689363

Valor crítico del rango estudentizado 4.19852

Diferencia significativa mínima 2.7285

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	tratamiento
A	66.6725	4	BM

B 49.0225 4 Control
 C 34.5350 4 CHS
 D 29.6250 4 CSC
 Sistema SAS 00:23 Friday, January 1, 2001 43

Procedimiento GLM

Variable dependiente: EBT

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	3327.117425	1109.039142	656.48	<.0001
Error	12	20.272350	1.689363		
Total correcto	15	3347.389775			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	EBT Media
0.993944	2.890673	1.299755	44.96375

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
tratamiento	3	3327.117425	1109.039142	656.48	<.0001

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
tratamiento	3	3327.117425	1109.039142	656.48	<.0001

Sistema SAS 00:23 Friday, January 1, 2001 46

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para EBT

NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un

índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	12
Error de cuadrado medio	1.689363
Valor crítico del rango estudentizado	4.19852
Diferencia significativa mínima	2.7285

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	tratamiento
A	66.6725	4	BM
B	49.0225	4	Control
C	34.5350	4	CHS
D	29.6250	4	CSC

Medias de mínimos cuadrados

para el efecto tratamiento

Simultáneo 95% Confidence

i	j	Diferencia entre medias	Limits for LSMean(i)-LSMean(j)
1	2	7.782500	5.050471 10.514529
1	3	9.462500	6.730471 12.194529
1	4	4.785000	2.052971 7.517029
2	3	1.680000	-1.052029 4.412029
2	4	-2.997500	-5.729529 -0.265471
3	4	-4.677500	-7.409529 -1.945471

tratamiento	Número	EBT LSMEAN	LSMEAN
BM	66.6725000	1	
CHS	34.5350000	2	
CSC	29.6250000	3	
Control	49.0225000	4	

Sistema SAS 00:23 Friday, January 1, 2001 49

Procedimiento GLM

Medias de cuadrados mínimos

Ajuste para comparaciones múltiples: Tukey

Medias de cuadrados mínimos para el efecto tratamiento

Pr > |t| for H0: LSMean(i)=LSMean(j)

Variable dependiente: EBT

i/j	1	2	3	4
1		<.0001	<.0001	<.0001
2	<.0001		0.0009	<.0001
3	<.0001	0.0009		<.0001
4	<.0001	<.0001	<.0001	
tratamiento	EBT LSMEAN	95% Límites de confianza		
BM	66.672500	65.256539	68.088461	
CHS	34.535000	33.119039	35.950961	
CSC	29.625000	28.209039	31.040961	
Control	49.022500	47.606539	50.438461	

Medias de mínimos cuadrados
para el efecto tratamiento

Simultáneo 95% Confidence

i	j	Diferencia entre medias	Limits for LSMean(i)-LSMean(j)	
1	2	32.137500	29.408975	34.866025
1	3	37.047500	34.318975	39.776025
1	4	17.650000	14.921475	20.378525
2	3	4.910000	2.181475	7.638525
2	4	-14.487500	-17.216025	-11.758975
3	4	-19.397500	-22.126025	-16.668975

Estadísticos descriptivos 00:04 Friday, January 1, 2001 1

Procedimiento MEANS

Variable de análisis : Dias

Tratamiento	Número de observaciones	Desviación Media	estándar	Mínimo	Máximo
BM	4	36.7500000	0.5000000	36.0000000	37.0000000
CHS	4	43.5000000	1.7320508	41.0000000	45.0000000
CSC	4	43.7500000	0.9574271	43.0000000	45.0000000
control	4	38.5000000	0.5773503	38.0000000	39.0000000

Estadísticos descriptivos 00:04 Friday, January 1, 2001 2

Procedimiento GLM

Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
Tratamiento	4	BM CHS CSC control
Número de observaciones	16	

Estadísticos descriptivos 00:04 Friday, January 1, 2001 3

Procedimiento GLM

Variable dependiente: Dias

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	150.2500000	50.0833333	44.52	<.0001
Error	12	13.5000000	1.1250000		
Total correcto	15	163.7500000			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Dias Media
0.917557	2.610856	1.060660	40.62500

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	150.2500000	50.0833333	44.52	<.0001

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	150.2500000	50.0833333	44.52	<.0001

Estadísticos descriptivos 00:04 Friday, January 1, 2001 4

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Dias

NOTA: Este test controla el índice de error de experimentwise de tipo I.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	12
Error de cuadrado medio	1.125
Valor crítico del rango estudentizado	4.19852
Diferencia significativa mínima	2.2266

Las comparaciones importantes del nivel 0.05 están indicadas por ***.

Tratamiento	Comparación	Diferencia entre medias	Simultáneo 95% Límites de confianza	
CSC	- CHS	0.2500	-1.9766	2.4766
CSC	- control	5.2500	3.0234	7.4766 ***
CSC	- BM	7.0000	4.7734	9.2266 ***
CHS	- CSC	-0.2500	-2.4766	1.9766
CHS	- control	5.0000	2.7734	7.2266 ***
CHS	- BM	6.7500	4.5234	8.9766 ***
control	- CSC	-5.2500	-7.4766	-3.0234 ***
control	- CHS	-5.0000	-7.2266	-2.7734 ***

control - BM	1.7500	-0.4766	3.9766	
BM - CSC	-7.0000	-9.2266	-4.7734	***
BM - CHS	-6.7500	-8.9766	-4.5234	***
BM - control	-1.7500	-3.9766	0.4766	

ANOVA de una via para aparicion de primordios 5
00:04 Friday, January 1, 2001

Procedimiento GLM

Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
Tratamiento	4	BM CHS CSC control
Número de observaciones	16	

ANOVA de una via para aparicion de primordios 6
00:04 Friday, January 1, 2001

Procedimiento GLM

Variable dependiente: Dias

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	3	150.2500000	50.0833333	44.52	<.0001
Error	12	13.5000000	1.1250000		
Total correcto	15	163.7500000			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Dias Media
0.917557	2.610856	1.060660	40.62500

Fuente	DF	Cuadrado de Tipo I SS	la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	150.2500000	50.0833333	44.52	<.0001

Fuente	DF	Cuadrado de Tipo III SS	la media	F-Valor	Pr > F
Tratamiento	3	150.2500000	50.0833333	44.52	<.

ANOVA de una via para aparicion de primordios 7
00:04 Friday, January 1, 2001

Procedimiento GLM

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para Dias

NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un

índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	12
Error de cuadrado medio	1.125
Valor crítico del rango estudentizado	4.19852
Diferencia significativa mínima	2.2266

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey	Agrupamiento	Media	N	Tratamiento
	A	43.7500	4	CSC
	A			
	A	43.5000	4	CHS
	B	38.5000	4	control
	B			
	B	36.7500	4	BM