UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

EFECTO DE LA ADICIÓN DE *Hericium erinaceus* SOBRE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES Y MICROESTRUCTURALES EN YOGUR BATIDO

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

Presenta:

ANA BETHSI HERNÁNDEZ RIVERA

Bajo la supervisión de: LANDY HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, DRA.

Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria

Chapingo, Estado de México, junio de 2026

EFECTO DE LA ADICIÓN DE *Hericium erinaceus* SOBRE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES Y MICROESTRUCTURALES EN YOGUR BATIDO

Tesis realizada por ANA BETHSI HERNÁNDEZ RIVERA bajo la supervisión de Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

DIRECTOR:_____

Dra. Landy Hernández Rodríguez

CODIRECTOR:_____

Dra. Monzerrat Rosas Espejel

ASESOR:_____

Dra. Rosy Gabriela Cruz Monterrosa

ASESOR:_____

Dra. Diana Itzel López Monterrubio

Contenido

LISTA DE CUADROS ..... *vii*

LISTA DE FIGURAS ..... *viii*

DEDICATORIAS ..... *ix*

AGRADECIMIENTO ..... *x*

DATOS BIOGRÁFICOS ..... *xi*

..... *xi*

RESUMEN GENERAL ..... *xii*

GENERAL ABSTRACT ..... *xiii*

1. INTRODUCCIÓN GENERAL *1*

1.1. Capítulos de la tesis **4**

1.2. Literatura citada **5**

2. REVISIÓN DE LITERATURA *6*

2.1. Hericium erinaceus: características, distribución y producción *6*

2.1.1. Descripción botánica y taxonómica **6**

2.1.2. Distribución geográfica y hábitat **6**

2.1.3. Producción y disponibilidad **7**

2.2. Propiedades nutricionales y funcionales de Hericium erinaceus *8*

2.2.1. Composición proximal (proteínas, carbohidratos, fibra, grasa) **8**

2.2.2. Compuestos bioactivos (hericenonas, erinacinas, polifenoles) **9**

2.2.3. Actividad antioxidante, antimicrobiana y beneficios potenciales para la salud **10**

2.3. Aprovechamiento de Hericium erinaceus en la industria alimentaria *11*

2.3.1. Productos desarrollados con hongos comestibles y medicinales **11**

2.3.2. Ejemplos de incorporación en matrices lácteas y fermentadas **12**

2.4. Harina de Hericium erinaceus *12*

2.4.1. Efecto del método de secado sobre los compuestos bioactivos **12**

2.4.2. Composición fitoquímica y proximal de la harina 13

2.5. Yogur batido 14

2.5.1. Proceso de elaboración del yogur batido 14

2.5.2. Consumo de yogur en México y tendencias de productos funcionales 15

2.5.3. Beneficios del yogur como alimento probiótico 16

2.6. Incorporación de ingredientes funcionales en yogur 17

2.6.1. Efecto en las propiedades sensoriales, fisicoquímicas y reológicas 17

2.6.2. Estudios previos con hongos comestibles y/o medicinales en yogur 19

2.7. Literatura citada 21

3. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA, FUNCIONAL Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE LA HARINA DE Hericium erinaceus 28

3.1. Resumen 28

3.2. Introducción 30

3.3.1. Ubicación del trabajo 32

3.3.2. Materiales 33

***3.3.3.* Acondicionamiento de *Hericium erinaceus* 33**

***3.3.3.1.* Deshidratación 33**

3.3.4. Caracterización fisicoquímica de *Hericium erinaceus* 34

3.3.4.1. Análisis químico proximal 34

3.3.4.2. Extracción, purificación y cuantificación de β-glucano 36

3.3.4.3. Determinación de color 38

3.3.5. Propiedades funcionales 38

3.3.5.1. **Poder de hinchamiento** 38

3.3.5.2. **Capacidad de la unión de la grasa (CUG).** 38

3.3.5.3. **Actividad emulsionante (AE)** 39

3.3.5.4. **Estabilidad de la emulsión (EE)** 39

3.3.6. Actividad antioxidante 40

3.3.6.1. **Ensayo DPPH** 40

3.3.6.2. **Ensayo ABTS** ... 40
3.3.7. Análisis estadístico ... **40**
3.4. Resultados y discusión ... ***41***
3.4.1. Caracterización fisicoquímica de *Hericium erinaceus* ... **41**
3.4.1.1. **Análisis químico proximal** ... 41
3.4.1.2. **Cuantificación de ß-glucanos.** ... 43
3.4.1.3. **Determinación de color** ... 44
3.4.2. Propiedades funcionales de Hericium erinaceus ... ***45***
3.4.2.1. Poder de hinchamiento ... **45**
3.4.2.2. Capacidad de la unión de la grasa ... **46**
3.4.2.3. Actividad emulsionante (AE) ... **47**
3.4.2.4. Estabilidad de la emulsión (EE) ... **48**
3.4.3. Actividad antioxidante de Hericium erinaceus ... ***49***
3.5. Conclusiones ... ***50***
3.6. Agradecimientos ... ***51***
3.7. Literatura citada ... ***52***
4. EFECTO DE LA ADICIÓN DE HERICIUM ERINACEUS SOBRE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES Y MICROESTRUCTURALES EN YOGUR BATIDO ... ***58***
4.1. Resumen ... ***58***
4.2. Introducción ... **60**
4.3. Materiales y métodos ... **61**
4.3.1. **Elaboración de yogur batido adicionado con *Hericium erinaceus*.** ... 61
4.3.2. Caracterización del yogur adicionado con *Hericium erinaceus* ... **63**
4.3.2.1. **Análisis químico proximal** ... 63
4.3.2.2. **Valor de pH, acidez titulable y sinéresis.** ... 64
4.3.2.3. **Determinación de color** ... 65
4.3.3. Contenido de actividad antioxidante ... **65**
4.3.3.1. **Capacidad de eliminación de radicales DPPH** ... 65
4.3.3.2. **Capacidad de eliminación de radicales ABTS** ... 65
4.3.4. Condiciones gastrointestinales simuladas ... **66**

4.3.5. Comportamiento reológico de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus* **67**
4.3.5.1. **Propiedades de flujo** 67
4.3.6. Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) **67**
4.3.7. Análisis microestructural **68**
4.3.8. Evaluación sensorial **68**
4.3.9. Análisis estadístico **68**
4.4. Resultados y discusión ***69***
4.4.1. Caracterización proximal del yogur adicionado con *Hericium erinaceus* **69**
4.4.2. Caracterización fisicoquímica del yogur adicionado con *Hericium erinaceus* **72**
4.4.2.1. **Determinación de pH y acidez titulable a través del tiempo** 73
4.4.2.2. **Determinación de sinéresis a través del tiempo** 78
4.4.2.3. **Determinación de color a través del tiempo** 81
4.4.3. Contenido de actividad antioxidante de los yogures a través del tiempo **86**
4.4.3.1. **Capacidad de eliminación de radicales DPPH** 86
4.4.3.2. **Capacidad de eliminación de radicales ABTS** 88
4.4.5. Comportamiento reológico de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus* **95**
4.4.5.1. **Propiedades de flujo** 95
4.4.6. Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) **101**
4.4.7. Microestructura de los yogures **104**
4.4.8. Evaluación sensorial **108**
4.5. Conclusiones **113**
4.6. Agradecimientos **113**
4.7. Literatura citada **114**

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Concentraciones empleadas para la determinación de glucosa. 37
Cuadro 2. Contenido químico proximal de *Hericium erinaceus*. 42
Cuadro 3. Espacio de color en muestras secas de *Hericium erinaceus.*..... 44
Cuadro 4. Formulación para las variaciones de yogur..... 62
Cuadro 5. Contenido químico proximal de los yogures adicionado con pulverizado de *Hericium erinaceus*. 69
Cuadro 6. Sinéresis de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus.* . 79
Cuadro 7. Color de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus.* 82
Cuadro 8. Actividad de eliminación de radicales DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) en muestras secas de *Hericium erinaceus.* 86
Cuadro 9. Actividad de eliminación de radicales ABTS (2,2'–azino–bis–(3-etillbenzotiazolin–6–sulfónico) en yogur adicionado con *Hericium erinaceus* durante almacenamiento durante 15 días. 89
Cuadro 10. Valores medios de los parámetros del modelo de Carreau. 96
Cuadro 11. Atributos sensoriales medidos y puntuaciones generales de aceptabilidad de las variaciones de yogur adicionado con *Hericium erinaceus.* 112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de la estrategia experimental. 32
Figura 2. Valores de pH de los yogures durante 15 días de almacenamiento. 74
Figura 3. Valores de acidez titulable representada en % p/p de ácido láctico de los yogures durante 15 días de almacenamiento. 76
Figura 4. Yogures fortificados con *Hericium erinaceus* al día 15 de almacenamiento. 81
Figura 5. Valores de porcentaje de inhibición de DPPH de los yogures durante el día cero de almacenamiento, fase gástrica y fase con sales biliares. 94
Figura 6. Valores de porcentaje de inhibición de ABTS de los yogures durante el día cero de almacenamiento, fase gástrica y fase con sales biliares. 94
Figura 7. Variación de la viscosidad aparente como función de la tasa de corte. 99
Figura 8. Espectro FTIR de los yogures control. 103
Figura 9. Micrografías de yogures control y adicionados. 107

DEDICATORIAS

A mis padres, las personas a las que más amo en el mundo, Guadalupe Rivera y José Hernández, les expreso mi más profundo agradecimiento por su amor incondicional y sacrificios que han hecho por mi, son lo más importante y valioso en mi vida.

A mi hermana Miriam, quien ocupa un lugar irremplazable en mi corazón, agradezco su compañía y apoyo incondicional a lo largo de este camino, por sostenerme en los momentos más difíciles y por recordarme siempre que no estoy sola. A mis hermanos José, Arturo y Daniel, les doy las gracias por su cariño y acompañamiento constante. Extiendo mi gratitud a mis cuñadas y cuñado Ivonne, Carmen, América y Sergio, por su cercanía e integrarse a mi círculo como un valioso respaldo emocional. A mis sobrinos Emma, Emilio y Julieta, agradezco la alegría y ternura que han traído a mi vida, convirtiéndose en una fuente permanente de luz.

A mi novio Abraham Mendoza, le agradezco su amor, paciencia y apoyo absoluto, por ser mi refugio cuando más lo necesité, gracias por acompañarme con comprensión, por sostenerme con tu cariño y por regalarme siempre palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante y ser mejor persona.

A mis mejores amigas Rubí Cotonieto y Azalia Álvarez, les agradezco su amistad sincera, su escucha constante, su empatía, sus valiosos consejos, pero sobre todo por convertirse en más que una red de apoyo emocional, en la familia que elegí a lo largo de este proceso.

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que me ayudaron a completar este proyecto merecen mi agradecimiento y gratitud pues sin ellos esta tesis no habría sido posible.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Departamento de Ingeniería Agroindustrial y al Departamento de Preparatoria Agrícola por las facilidades brindadas para el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por el equipo y apoyo técnico en el escaneo electrónico para el análisis microscópico de las muestras.

A mi comité asesor, Dra. Diana Itzel López Monterrubio y Dra. Rosy Gabriela Cruz Monterrosa por sus asesorías, consejos y ayuda en el manejo de equipos necesarios para la realización de este proyecto. Especialmente a mi directora Dra. Landy Hernández Rodríguez y mi codirectora Dra. Monzerrat Rosas Espejel por su orientación, paciencia, comprensión y valiosas aportaciones. Su guía académica fue esencial para la culminación de este trabajo, y sus enseñanzas permanecerán como parte fundamental de mi formación profesional.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Ana Bethsi Hernández Rivera
Fecha de nacimiento	26 de diciembre de 2001
Lugar de nacimiento	Toluca, Estado de México, México
CURP	HERA011226MMCRVNA8
Profesión	Licenciatura en Ciencia y Tecnología de Alimentos
Cédula profesional	14334322

Desarrollo académico

Bachillerato: Laboratorista Químico, Centro De Bachillerato Tecnológico, Industrial y de Servicios No. 203 · "Gral. Ignacio M. Beteta Quintana", Metepec, Estado de México.

Licenciatura: Licenciatura en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma.

RESUMEN GENERAL

EFECTO DE LA ADICIÓN DE *Hericium erinaceus* SOBRE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES Y MICROESTRUCTURALES EN YOGUR BATIDO

La presente investigación evidenció que *Hericium erinaceus* posee un importante potencial como ingrediente funcional en productos lácteos fermentados. La harina del hongo presentó un perfil proximal caracterizado por baja humedad (9.79 ± 0.03 %), proteína cruda (14.84 ± 0.07 %), fibra cruda (17.15 ± 0.01 %) y predominio de carbohidratos (49.69 ± 0.46 %), además de una elevada concentración de β-glucanos (81.02 ± 0.72 %) y alta actividad antioxidante, con inhibición de 81.09 ± 1.24 % para ABTS•+ y 85.14 ± 0.92 % para DPPH•, lo que confirma su valor nutracéutico y funcional. Asimismo, presentó propiedades tecnofuncionales adecuadas para aplicaciones alimentarias, destacando una capacidad de retención de agua de 5.92 ± 0.19 g/g, capacidad de hinchamiento de 3.18 ± 0.01 %, actividad emulsificante de 84.13 ± 0.11 % y estabilidad emulsificante de 56.55 ± 0.15 %. La incorporación de harina de *Hericium erinaceus* en yogures batidos reducidos en grasa produjo cambios significativos ($p < 0.05$) en las propiedades fisicoquímicas, antioxidantes, reológicas y microestructurales durante 15 días de almacenamiento. Los tratamientos enriquecidos mostraron incremento en proteína (21.99 ± 0.43 %) y cenizas (3.90 ± 0.15 %), mientras que la viscosidad aumentó conforme se incrementó la concentración del hongo, alcanzando el valor más alto en $YBG_{0.15}$ (693.15 ± 8.32 Pa·s). Además, los yogures adicionados presentaron mayor estabilidad antioxidante y una microestructura más integrada y cohesiva. Durante el almacenamiento, el pH disminuyó y la acidez titulable aumentó, asociado a una mayor actividad de bacterias ácido-lácticas. Finalmente, el análisis sensorial mostró una aceptabilidad moderada de las formulaciones enriquecidas, sin afectar significativamente atributos como color y sabor.

Palabras clave: *Hericium erinaceus*, bacterias ácido-lacticas, reología, microestructura, condiciones gastrointestinal simuladas.

Tesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Ana Bethsi Hernández Rivera
Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

GENERAL ABSTRACT

EFFECT OF THE ADDITION OF *Hericium erinaceus* ON THE FUNCTIONAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF STIRRED YOGURT.

The present research demonstrated that *Hericium erinaceus* possesses significant potential as a functional ingredient in fermented dairy products. The mushroom flour presented a proximate composition characterized by low moisture (9.79 ± 0.03 %), crude protein (14.84 ± 0.07 %), crude fiber (17.15 ± 0.01 %), and carbohydrates as the major component (49.69 ± 0.46 %), in addition to a high concentration of β-glucans (81.02 ± 0.72 %) and high antioxidant activity, with inhibition values of 81.09 ± 1.24 % for ABTS•+ and 85.14 ± 0.92 % for DPPH•, confirming its nutraceutical and functional value. Likewise, it presented adequate technofunctional properties for food applications, highlighting a water-holding capacity of 5.92 ± 0.19 g/g, swelling capacity of 3.18 ± 0.01 %, emulsifying activity of 84.13 ± 0.11 %, and emulsifying stability of 56.55 ± 0.15 %. The incorporation of *Hericium erinaceus* flour into reduced-fat stirred yogurts produced significant changes ($p < 0.05$) in physicochemical, antioxidant, rheological, and microstructural properties during 15 days of storage. The enriched treatments showed an increase in protein (21.99 ± 0.43 %) and ash (3.90 ± 0.15 %), while viscosity increased as the mushroom concentration increased, reaching the highest value in $YBG_{0.15}$ (693.15 ± 8.32 Pa·s). Furthermore, the supplemented yogurts presented greater antioxidant stability and a more integrated and cohesive microstructure. During storage, pH decreased and titratable acidity increased, associated with greater activity of lactic acid bacteria. Finally, sensory analysis showed moderate acceptability of the enriched formulations, without significantly affecting attributes such as color and flavor.

Keywords: *Hericium erinaceus*, lactic acid bacteria, rheology, microstructure, simulated gastrointestinal conditions.

Thesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Ana Bethsi Hernández Rivera
Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los hongos comestibles han sido valorados por su sabor, aroma y propiedades funcionales que benefician la salud humana. Actualmente, la ciencia de los alimentos investiga sus compuestos bioactivos, los cuales poseen propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias, inmunomoduladoras y antitumorales (Fernández et al., 2021). Según la Functional Food Science in Europe (Ciencia de los Alimentos Funcionales en Europa, FUFOSE) un alimento es funcional si, además de nutrir, tiene efectos positivos en el organismo (Luna et al*.,* 2023). México cuenta con una gran diversidad de hongos silvestres comestibles, como gírgolas (*Pleurotus ostreatus*) y colmenillas (*Morchella spp.*), recolectadas principalmente en regiones de Chiapas, Puebla, Oaxaca, Hidalgo, Michoacán y el Estado de México. Se estima que hay alrededor de 400 especies comestibles, aunque muchas no han sido clasificadas (CONAFOR, 2022). *Hericium erinaceus*, popularmente conocido como Melena de León, es un hongo que ha sido usado tradicionalmente en la medicina asiática para tratar diferentes enfermedades; dentro de los compuestos presentes en este hongo, se han registrado actividades biológicas como antitumoral, hipolipemiante, hemaglutinante, citotóxica, antimicrobiana y actividades antioxidantes; nutricionalmente es una fuente rica de proteínas, fibras, y varios nutrientes esenciales como vitaminas del grupo B, minerales como potasio y zinc (Luna et al., 2023). La producción de *Hericium erinaceus* es limitada en México, no existen cifras exactas de su volumen de producción, su cultivo es intensivo en cuidados específicos de temperatura, humedad y ventilación para lograr una producción óptima, se estima que representa una fracción baja de la producción nacional de hongos comestibles, lo cual subraya su nicho en el mercado de hongos medicinales en México se cultiva en cantidades relativamente pequeñas y su producción se concentra en granjas especializadas en biotecnología y micología aplicada en estados como

Morelos y Michoacán, donde son aprovechadas las condiciones de clima y sustratos adecuados como aserrín de maderas duras (Notsi, 2024). La leche constituye una materia prima de alto valor nutricional que se utiliza en la elaboración de diversos productos lácteos, entre ellos el yogur. Este producto se obtiene mediante la fermentación láctica de la leche por la acción de cultivos iniciadores, constituidos tradicionalmente por *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, cuya actividad provoca una disminución del pH (4.0 4.6) y también se relaciona con la acidez (70-90° D), la coagulación de las proteínas lácteas (Codex Alimentarius, 2010). Además de su aporte nutricional, el yogur ha sido estudiado por sus posibles efectos benéficos para la salud; sin embargo, su clasificación como alimento funcional y la atribución de propiedades probióticas dependen de sus características y de la evidencia científica disponible (Savaiano y Hutkins, 2021). Durante los últimos años, el yogur ha sido objeto de estudio por los beneficios atribuibles a su consumo, pues es un alimento de alta densidad nutricional, fuente de minerales, vitaminas y proteínas de alta calidad, que contribuyen de forma notoria a cubrir los requerimientos de diversos micronutrientes (Panahi et al., 2016). Los productos lácteos fermentados son alimentos muy apreciados por los consumidores debido a sus propiedades texturales y sensoriales, su calidad nutricia y el beneficio que proporcionan a la salud. En los últimos años los consumidores han dirigido su interés hacia productos reducidos en grasa ya que son asociados con la reducción de riesgos de obesidad y enfermedades coronarias. El consumo de alimentos bajos en grasa se ha transformado para muchas personas, en una forma de vida asociada en el cuidado de su salud (Akalin, 2007). De acuerdo con lo anterior, se adicionará *Hericium erinaceus* pulverizado en un yogur batido. Este proyecto va dirigido a la población mexicana en general, pues estudios acerca del consumo de yogur en México, informan que el 8.5% de la población consume yogur, entre estos consumidores, el yogur contribuye aproximadamente con un 10 % de la energía total de la dieta. El consumo de yogur tanto sólido como bebible es bajo en comparación con la leche (Rivera et al., 2014). Mientras que el

consumo per cápita de leche en México alcanza en promedio los 131 litros por persona al año, el de yogur es considerablemente menor, con solo 18 kilogramos por persona. Esta ingesta se ha incrementado por la amplia variedad de sabores de yogures bebibles y su accesibilidad (García., 2008). El objetivo de añadir *Hericium erinaceus* pulverizado al yogur es evaluar su efecto en las propiedades sensoriales, fisicoquímicas, mecánicas y microestructurales del producto. Dado que el yogur es un alimento funcional y forma parte importante de la dieta humana, se busca innovar este producto para aprovechar los nutrientes del hongo, el cual aún no se ha incorporado al mercado en esta forma, representando así una alternativa novedosa de consumo.

1.1. **Capítulos de la tesis**

El presente documento de tesis está conformado por los siguientes capítulos:

a) Capítulo 1: Presenta una introducción general del tema abordado durante esta investigación donde se aborda el planteamiento y desarrollo de la misma. Se muestra el objetivo general y los objetivos específicos establecidos para comprobar la hipótesis planteada. En esta sección se explican los contenidos que conforman este documento.

b) Capítulo 2: Muestra el estado del arte relacionado con la problemática abordada en la presente investigación. Inicialmente, se describe de manera general la problemática a resolver, así como las principales características botánicas y taxonómicas de *Hericium erinaceus*, a partir del cual se elaboró la harina, más adelante se profundiza en sus propiedades funcionales y características fisicoquímicas, y el efecto del método de secado sobre sus compuestos bioactivos.

c) Capítulo 3: Corresponde a la primera sección de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación. En este apartado se describen los procedimientos y las condiciones empleadas para realizar la caracterización fisicoquímica, funcional y antioxidante de la harina de *Hericium erinaceus*. Asimismo, se presentan los resultados derivados de los análisis proximales, fisicoquímicos, antioxidantes y funcionales realizados en la harina.

d) Capítulo 4: En esta sección se presenta la segunda etapa de las pruebas realizadas durante la presente investigación, relacionadas con la incorporación de harina de *Hericium erinaceus* en un yogur batido. En este capítulo se describe el proceso de elaboración del yogur, así como los tratamientos aplicados y las pruebas empleadas para evaluar el efecto de la adición de la harina. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos para cada tratamiento en los análisis proximales, fisicoquímicos, antioxidantes, reológicos, microestructurales y sensoriales.

1.2. **Literatura citada**

Fernández, P., Haza, A., & Morales, P. (2021). Propiedades funcionales de Hongos Comestibles. Agro Sur, 48(1), 11-24. https://doi.org/10.4206/agrosur.2020.v48n1-02

Comisión Nacional Forestal (2022). Blog Forestal: HONGOS SILVESTRES COMESTIBLES: SABERES, SABORES Y TRADICIONES. Diponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/909733/Hongos_silvestres_comestibles-_saberes__sabores_y_tradiciones.pdf

Luna Bonilla D., RamírezElías M., Zamora Júarez A., (2023). Melena De León (Hericium Erinaceus): El Guardián Neuroprotector. Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 55-67. ISSN 2448-5829.

Cultivo de hongos: Recursos Gratuitos archivos - Notsi - Micofinca. (s. f.). Notsi (2024) - Micofinca. https://notsi.mx/category/cultivo-de-hongos-recursos

Panahi, S., Fernandez, M. A., Marette, A., & Tremblay, A. (2016). Yogurt, diet quality and lifestyle factors. European Journal Of Clinical Nutrition, 71(5), 573-579. https://doi.org/10.1038/ejcn.2016.214

Akalin, A. S., Karagözlü, C. y Ünal, G. (2008). Rheological properties of reduced-fat and low-fat ice cream containing whey protein isolate inulin. European Food Research Technology, 227, 889-895.

Rivera, J. A., Muñoz-Hernández, O., Rosas-Peralta, M., Aguilar-Salinas, C. A., Popkin, B. M., & Willett, W. C. (2014). Consumo de bebidas para una vida saludable: recomendaciones para la población mexicana. Salud Pública de México, 50(2), 173-195. https://doi.org/10.1590/s0036-36342008000200011

García J. (2008). Valoración de la calidad del yogur elaborado con distintos tipos de fibra de trigo. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 1-98.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. *Hericium erinaceus*: características, distribución y producción

2.1.1. Descripción botánica y taxonómica

Hericium erinaceus es un hongo que se conoce de manera común como "melena de león", actualmente ha capturado el interés científico debido a su abundante contenido de compuestos bioactivos y sus múltiples beneficios para la salud, considerándose un hongo medicinal y funcional. Taxonómicamente, *H. erinaceus* pertenece al Reino Fungi, *Filo Basidiomycota*, clase *Agaricomycetes*, orden *Russulales* y familia *Hericiaceae* (Jahedi A., Ahmadifar S., Mohammadigoltapeh E., 2024). Si bien el género *Hericium* incluye otras especies como *Hericium coralloides* y *Hericium americanum*, *H. erinaceus* se distingue por su morfología única y sus atributos medicinales (Boddy L., Crockatt M., Ainsworth A., 2011). El cuerpo fructífero de *H. erinaceus* es globular o semiesférico, de color blanco a crema en sus primeras etapas, y se vuelve amarillento o marrón al madurar. A diferencia de muchos hongos comestibles con estructura de sombrero y tallo, *H. erinaceus* carece de una clara diferenciación morfológica, creciendo de forma compacta con leves espinas densamente agrupadas (Almjalawi B., Chechan R., Alhesnawi A., 2024).

2.1.2. Distribución geográfica y hábitat

Hericium erinaceus posee una amplia distribución en el hemisferio norte, en Eurasia, su presencia está documentada desde el Cáucaso, a través de Asia Central, hasta China, Japón y Corea. En Europa, su distribución es generalizada, aunque la frecuencia varía; los países con más registros son Francia, Gran Bretaña, Alemania, Países Bajos y España, también se ubica en América del Norte y Central (Kałucka I., y Olariaga Ibarguren, I., 2019), en México, se puede encontar de manera silvestre, principalmente en los bosques templados de la Sierra Madre Occidental, con registros en estados como Durango y Chihuahua, aunque también se puede encontrar en centros

de biotecnonología. Además de su distribución silvestre, existe un interés y actividad de cultivo comercial en el país que se relaciona con la investigación y el desarrollo de estudios en México para evaluar el cultivo de cepas silvestres de *H. erinaceus*, utilizando sustratos locales como el bagazo de agave, un residuo de la producción de mezcal, con el fin de promover la bioconversión sostenible (Páez-Olivan et al., 2022, Páez-Olivan., et al., 2024) además de la comercialización, ya que diversas empresas y centros de investigación mexicanos ofrecen kits de cultivo casero, micelio (cepas) y producto fresco *de H. erinaceus*, indicando una creciente producción local para el mercado de alimentos funcionales y gourmet*. H. erinaceus* es un hongo saprotrófico y parásito débil que típicamente prospera en bosques templados con alta humedad y temperaturas moderadas (Conte-Junior et al*.,* 2025, Cesaroni et al., 2019). Coloniza principalmente árboles de madera dura incluyendo especies como el roble (*Quercus spp*.), haya (*Fagus spp.*), arce (*Acer spp*.), nogal (*Juglans spp*.) y abedul (*Betula spp*.). Está clasificado como hongo de pudrición blanca, su papel es fundamental en la descomposición de material lignocelulósico, ya que degrada la lignina de manera eficiente (Atila F., 2019). Su naturaleza de parásito facultativo le permite subsistir tanto en madera viva como muerta, contribuyendo así a la biodiversidad y regeneración del ecosistema forestal, en la naturaleza, el cuerpo fructífero suele aparecer a finales del verano y durante el otoño, por lo general crece en posiciones elevadas en los troncos, dificultando su detección y recolección en comparación con los hongos terrestres (Kunca, V., & Ciliak, M., 2017, Harikrishnan et al., 2011, Wang et al., 2017).

2.1.3. **Producción y disponibilidad**

El hongo funcional *Hericium erinaceus* se produce a nivel comercial mediante el cultivo del cuerpo fructífero en sustratos lignocelulósicos y la fermentación en estado sólido (FES) de la biomasa micelial, según el compuesto bioactivo de interés. Se tiene registrado que, para la producción de cuerpos fructíferos, que son una fuente importante de polisacáridos y nutrientes, se han

optimizado fórmulas que buscan reemplazar la madera tradicional por residuos agrícolas. Por ejemplo, en regiones tropicales, el serrín de caucho demostró ser un sustrato altamente efectivo (Chutimanukul et al., 2023), mientras que otras investigaciones lograron una alta eficiencia biológica utilizando mezclas optimizadas de paja de arroz y olote de maíz, mejorando además el contenido de proteínas y oligoelementos del producto cosechado (Lu et al., 2024).

En cuanto a su disponibilidad y composición, existe una marcada diferenciación entre el tejido del micelio y el cuerpo fructífero. Los compuestos neuroactivos clave, como las erinacinas, las cuales se encuentran predominantemente en el micelio, con el cuerpo fructífero produciendo típicamente cantidades indetectables (Doar et al., 2025).

2.2. **Propiedades nutricionales y funcionales de *Hericium erinaceus***

2.2.1. **Composición proximal (proteínas, carbohidratos, fibra, grasa)**

El análisis químico proximal de los cuerpos fructíferos y el micelio de *Hericium erinaceus* establece su perfil como un alimento funcional de alto valor nutricional, destacando la predominancia de carbohidratos del 60 al 80 % del peso seco y proteínas en un rango del 15 al 30 % junto con un bajo contenido de lípidos, aproximadamente menor al 5 % (Friedman, 2015; Kostanda et al*.,* 2024). La fracción de carbohidratos es el componente cuantitativamente más abundante e incluye una porción significativa de fibra dietética aproximada al 30 %, donde los polisacáridos, particularmente los β-glucanos, son de especial interés por sus reconocidas propiedades funcionales y bioactividades. En contraste, el contenido de lípidos es consistentemente bajo, contribuyendo al perfil saludable del hongo (Friedman, 2015). Un punto focal en la composición es el contenido de proteínas, que es considerablemente alto en comparación con muchas fuentes vegetales.

La fracción de cenizas varia entre el 2 y el 8% que representa el contenido mineral (Heleno et al*.,* 2015). La composición proximal de *H. erinaceus* es

dinámica y está fuertemente influenciada por las condiciones de cultivo. Por ejemplo, el tipo de sustrato lignocelulósico utilizado afecta la composición final del hongo (Atila et al*.,* 2019).

2.2.2. **Compuestos bioactivos (hericenonas, erinacinas, polifenoles)**

Hericium erinaceus es valorado por su potencial neurotrófico, atribuido principalmente a dos clases de metabolitos secundarios: las hericenonas y las erinacinas. Estos compuestos se segregan por distintas partes del hongo, y ambos son reconocidos por su capacidad de estimular la biosíntesis del Factor de Crecimiento Nervioso (NGF) (Ma et al*.,* 2010).

Las hericenonas son meroterpenoides (estructuras híbridas de terpenos y fenoles) que se encuentran de manera característica en el cuerpo fructífero del hongo. Estudios recientes han explorado a fondo su caracterización y han propuesto vías biosintéticas para su formación, confirmando su existencia endógena en los extractos de la parte aérea del hongo (Wang et al., 2024). Las hericenonas (como C-H) han sido históricamente citadas como estimuladores de NGF, lo que sugiere un rol en la prevención y tratamiento de la demencia (Ma et al., 2010; Wang et al*.,* 2024).

Por otro lado, las erinacinas son una clase de diterpenoides de tipo ciatano, encontradas predominantemente en el micelio (las hifas vegetativas) del hongo (Ma et al., 2010). La Erinacina A es el representante principal y es particularmente valiosa porque, a diferencia de muchos otros compuestos, puede cruzar la barrera hematoencefálica (BHE) para inducir la expresión de NGF directamente en el sistema nervioso central (Ma et al., 2010; Spangenberg et al*.,* 2025). Su gran potencial terapéutico ha llevado a investigar métodos de cuantificación y aislamiento más robustos, demostrando que el rendimiento y contenido de Erinacina A en el micelio fermentado varía significativamente entre cepas (Liu et al., 2024). La importancia de este grupo se extiende más allá del NGF: una revisión sistemática reciente subraya que las erinacinas (A y C) activan vías de señalización de supervivencia, inducen respuestas antioxidantes, poseen

efectos antiinflamatorios, y mejoran los resultados cognitivos y conductuales en modelos preclínicos (Spangenberg et al., 2025).

Además de estos diterpenoides y meroterpenoides, el hongo contiene otros compuestos neuroactivos como los derivados de hericerina (relacionados con las erinacinas), que activan una vía pan-neurotrófica y han demostrado mejorar la memoria y la plasticidad sináptica en modelos animales (Martínez-Mármol et al., 2023). El perfil químico general de *Hericium erinaceus* es amplio, incluyendo más de 200 metabolitos, entre los que se cuentan polifenoles (fenólicos), esteroides y polisacáridos, aunque la actividad neuroprotectora directa se atribuye mayoritariamente a las hericenonas y erinacinas (Wang et al*.,* 2024).

2.2.3. **Actividad antioxidante, antimicrobiana y beneficios potenciales para la salud**

Se ha demostrado que *Hericium erinaceus* es consistentemente un notable potencial como agente antioxidante y antimicrobiano, confirmando su uso histórico en la medicina tradicional para trastornos gastrointestinales (Gravina et al*.,* 2023). Su actividad antioxidante es multifacética y depende en gran medida del método de extracción: los extractos producidos con solventes de mayor polaridad, como el etanol y el agua destilada, exhiben las actividades más altas, demostrando una potente capacidad para secuestrar radicales libres DPPH, y ABTS, así como para inhibir la peroxidación lipídica, en comparación con solventes menos polares (Jiang et al., 2016). Estas propiedades se deben a su rico perfil de compuestos bioactivos, incluidos polisacáridos, terpenoides y, en particular, péptidos funcionales, que no solo actúan como antioxidantes sino que también ofrecen oportunidades para el desarrollo de suplementos alimentarios, como los quelatos péptido-calcio (Gu et al*.,* 2024). En el ámbito antimicrobiano, la investigación ha validado su aplicación contra patógenos gástricos clave, identificando que extractos no polares (como los de éter de petróleo) poseen una fuerte actividad anti-*Helicobacter pylori*, atribuida a compuestos específicos como el 1-(5-cloro-2-

hidroxifenil)-3-metil-1-butanona y el ácido 2,5-bis(metoxicarbonil)tereftálico (Liu et al., 2016), la evidencia preclínica y clínica posiciona a *H. erinaceus* como un prometedor nutracéutico con capacidad para modular el estrés oxidativo y combatir infecciones microbianas, especialmente en el tracto gastrointestinal (Gravina et al., 2023).

2.3. **Aprovechamiento de *Hericium erinaceus* en la industria alimentaria**

2.3.1. **Productos desarrollados con hongos comestibles y medicinales**

El aprovechamiento de los hongos comestibles y medicinales, como el *Hericium erinaceus*, ha evolucionado del consumo directo hacia un procesamiento profundo que busca la valorización integral de la biomasa y el desarrollo de alimentos funcionales innovadores (Qin et al., 2024; Rangel-Vargas et al., 2021). La industria alimentaria está explorando activamente la inclusión de hongos como ingredientes o aditivos naturales sustitutos en diversos productos, aprovechando sus perfiles nutricionales y bioactivos (Rangel-Vargas et al., 2021). Un área central de desarrollo es la fermentación (Food Production, Processing and Nutrition, 2025). Esta técnica no solo mejora las propiedades organolépticas, sino que también los incrementa.

Más allá de los alimentos convencionales, el procesamiento profundo se extiende a la modificación de subproductos y el desarrollo de fibras dietéticas funcionales. Un ejemplo de esto es la fermentación en estado sólido de *H. erinaceus* para alterar la estructura y las propiedades fisicoquímicas de la fibra dietética soluble derivada del rastrojo de maíz, lo que demuestra un método para el aprovechamiento industrial y la mejora de ingredientes alimentarios (Ban et al., 2024). Este enfoque subraya el potencial de los hongos en la creación de una nueva generación de alimentos funcionales y nutracéuticos.

2.3.2. **Ejemplos de incorporación en matrices lácteas y fermentadas**

La versatilidad de *H. erinaceus* es evidente en su incorporación a matrices alimentarias, especialmente las lácteas y fermentadas. La fermentación se utiliza para crear bebidas funcionales ricas en nutrientes; por ejemplo, se ha desarrollado un jugo fermentado de *H. erinaceus* enriquecido significativamente con L-glutamina y ácido L-glutámico (Woraharn et al., 2015). De manera similar, se ha creado un jugo fermentado mediado por la bacteria láctica *Lactobacillus fermentum* para obtener un suplemento funcional destinado a la gestión de la diabetes mellitus (Chaiyasut et al., 2018).

En las matrices lácteas, la aplicación es dual: como ingrediente activo y como auxiliar tecnológico. Por un lado, se han realizado estudios sobre la reología y la digestibilidad in vitro de la leche enriquecida con biomasa de *H. erinaceus* y fuentes proteicas adicionales (Food Chemistry, 2024). Por otro lado, las enzimas extraídas del hongo se han empleado directamente para la producción de alimentos. Específicamente, se han utilizado enzimas coagulantes obtenidas de *H. erinaceus* para producir queso, logrando no solo la coagulación de la leche, sino también confiriéndole al producto final propiedades de inhibición del crecimiento fúngico (Food Science and Technology Research, 2020). Este amplio rango de aplicaciones subraya el papel de los hongos comestibles como ingredientes ricos en nutrientes para productos alimentarios más saludables (Foods, 2023).

2.4. **Harina de *Hericium erinaceus***

2.4.1. **Efecto del método de secado sobre los compuestos bioactivos**

El método de secado para la obtención de harinas de hongos es un factor crítico que determina la retención de compuestos bioactivos que estos contengan y también la calidad organoléptica que se puede generar. En el caso de los hongos comestibles y medicinales, se ha demostrado que la elección de la tecnología influye directamente en los atributos de sabor y

aroma, factores los cuales son importantes al momento de adicionar en otros alimentos y que están intrínsecamente ligados a los compuestos no volátiles y volátiles presentes (Walde et al., 2006). En el caso específico de *Hericium erinaceus,* la preservación de sus compuestos neuroprotectores únicos y antioxidantes, como el ergosterol, la hericenona C y la hericina A, son de suma importancia. En 2022 se publicó un estudio que analizó el contenido bioactivo de *Hericium erinaceus* el cual utilizó la liofilización para secar las muestras, un método de baja temperatura comúnmente preferido en la investigación para minimizar la degradación de compuestos termosensibles (Tachabenjarong et al., 2022). Para la obtención de la harina de *Hericium erinaceus*, la temperatura es un factor clave para conservar sus compuestos bioactivos, como el ergosterol y los ácidos fenólicos. La temperatura óptima de secado por aire caliente generalmente se encuentra entre 40 °C y 60 °C, ya que temperaturas más altas, como 70 °C, han demostrado provocar la mayor reducción en el contenido de fenólicos totales, ergosterol y actividad antioxidante, con pérdidas significativas de ácidos orgánicos que pueden superar el 90 % (Gasecka et al., 2020) además del secado por liofilización, conocido por su alta retención de calidad, otros métodos de secado explorados para *H. erinaceus* incluye el secado por aire caliente a diversas temperaturas y combinaciones de pretratamientos y secado, las cuales son evaluadas por su impacto en la retención de compuestos funcionales como el β-glucano y la actividad antioxidante, buscando equilibrar la calidad del producto con la eficiencia del proceso (Yang et al., 2021).

2.4.2. **Composición fitoquímica y proximal de la harina**

La composición nutricional y fisicoquímica de *Hericium erinaceus* lo establece como un hongo medicinal, comestible y funcional, desde una perspectiva proximal, el hongo se caracteriza por su alto contenido de agua (85-90%), proteínas (10-20%), carbohidratos (50–60%) y fibra dietética (4-10%) en base seca (Gonkhom, D et al., 2024). Su bajo contenido de lípidos (2-4%) lo convierte en un alimento ideal para dietas de bajas calorías, es también una

fuente rica de micronutrientes esenciales; contiene una variedad de vitaminas (B1, B2, B3, B9, B12, C, D y ergosterol) en concentraciones que varían entre 0.1 y 5 mg/100 g, además de bioelementos (Lazur et al., 2024). Estos incluyen minerales macro y micro, como potasio (K: 1500–2500 mg/100 g), magnesio (Mg: 80–150 mg/100 g), calcio (Ca: 20–60 mg/100 g), hierro (Fe: 5–15 mg/100 g), zinc (Zn: 2–8 mg/100 g), manganeso (Mn: 0.5–2 mg/100 g), cobre (Cu: 0.3–1 mg/100 g) y sodio (Na: 10–40 mg/100 g); esta composición balanceada subraya su valor como nutracéutico que combina alto valor nutricional con beneficios preventivos y terapéuticos (Ge et al., 2025). En cuanto a su composición fisicoquímica, *Hericium erinaceus* ha sido investigado en los últimos años por su concentración de compuestos bioactivos. El principal grupo de componentes activos lo constituyen los polisacáridos, seguido de los terpenoides, específicamente las hericenonas y erinacinas, que han sido ampliamente estudiados por su capacidad para estimular el factor de crecimiento nervioso, además, es una fuente significativa de ácidos fenólicos y fenólicos totales, que son componentes bioactivos de bajo peso molecular que confieren una fuerte capacidad antioxidante al hongo, algunos otros compuestos importantes que contribuyen a su bioactividad incluyen diterpenoides, xantonas, isoflavonas, glicoproteínas, aminoácidos, ácidos grasos y compuestos específicos como la lovastatina y la ergotioneína (Heleno et al., 2015).

2.5. **Yogur batido**

2.5.1. **Proceso de elaboración del yogur batido**

La producción del yogur batido comienza con la preparación de la leche, que se estandariza en contenido de grasa y sólidos totales, pudiendo incluir la adición de ingredientes como concentrados de proteína de suero para mejorar la firmeza y reducir la sinéresis en productos bajos en grasa, una vez pasteurizada y enfriada, la leche se inocula con los cultivos iniciadores como *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus*, las cuales son las bacterias ácido lácticas mas comunes y se incuba,

generalmente a temperaturas alrededor de 35 a 45°C, hasta que el pH baja y se forma una red de gel proteica estable, posteriormente se refrigera a 4°C para después pasar a la etapa definitoria, la cual es el batido o cizallamiento del gel y almacenamiento en enfriamiento nuevamente para la reconstrucción de la estructura del producto, así de esta manera general un aumento en la viscosidad fina, el batido rompe la frágil red de caseína, disminuyendo drásticamente la viscosidad y la elasticidad, y la temperatura a la que se realiza este alisado impacta directamente en la microestructura final del producto un ejemplo de ello es la temperatura ambiente (20-24°C) produce una red proteica más homogénea con menos sinéresis (Gilbert et al., 2020; Guénard-Lampron et al., 2020; Le Ba et al., 2025).

2.5.2. **Consumo de yogur en México y tendencias de productos funcionales**

En México, el consumo de yogur ha mostrado crecimiento durante la última década, impulsado por la tendencia hacia alimentos saludables y funcionales que promuevan el bienestar general además de nutrir; aun así, su consumo per cápita continúa siendo inferior al observado en países europeos, debido a diferentes factores culturales, económicos y a la limitada percepción de sus beneficios nutricionales. López-Cardoso y colaboradores en 2024 publicaron un artículo sobre las preferencias de consumo de alimentos funcionales en Culiacán, Sinaloa, el cual reveló que el yogur se encuentra entre los tres productos funcionales más elegidos por los consumidores, junto con las bebidas y las barras energéticas, siendo el sabor y la accesibilidad los principales determinantes de compra. Estos resultados confirman la disposición del público mexicano a incorporar productos funcionales derivados de lácteos, siempre que mantengan atributos sensoriales agradables y sobre todo precios accesibles. Asimismo, Tovar y Herrera en 2017 señalaron en el programa global de colaboración científica y divulgación “Yogurt in Nutrition Initiative” impulsado por el Instituto Danone Internacional presentado en México, que la educación nutricional y la promoción del yogur

como alimento funcional son esenciales para aumentar su consumo, especialmente en poblaciones con baja familiaridad con los probióticos, lo cual como consecuencia se relacionan con problemas gastrointestinales en la actualidad, en conjunto, estas evidencias sugieren que el mercado mexicano ofrece un potencial favorable para el desarrollo de yogures batidos funcionales, y que aunque ya existan muchas marcas, siempre que se integren estrategias de comunicación claras sobre sus beneficios y se prioricen las características sensoriales al adicionar complementos, son mas valorados por el consumidor.

2.5.3. **Beneficios del yogur como alimento probiótico**

El yogur es reconocido como uno de los alimentos probióticos más consumidos a nivel mundial por su capacidad para mejorar la salud intestinal y fortalecer el sistema inmunológico, su valor radica en la presencia de microorganismos vivos principalmente *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus y Streptococcus thermophilus*, los cuales favorecen el equilibrio de la microbiota intestinal y la digestión de la lactosa, el consumo habitual de yogur no solo contribuye a la parte gastrointestinal, sino que también mejora la absorción de calcio y reduce el riesgo de infecciones intestinales (Adolfsson, Meydani y Russell., 2004). En esta misma línea, Yogurt in Nutrition Initiative ha destacado que los consumidores frecuentes de yogur presentan perfiles dietéticos más saludables y un menor riesgo de síndrome metabólico y obesidad, gracias a su aporte de proteínas de alta calidad, calcio y bacterias benéficas (YINI, 2023). Por otra parte, también se evidencia que el consumo de yogur influye positivamente en la salud ósea y la modulación de la microbiota (Fernández, Lázaro y Molina., 2025).

Diversas investigaciones también destacan que el consumo habitual de yogur se asocia con menor riesgo de obesidad, dislipidemias y diabetes tipo 2, al mejorar la sensibilidad a la insulina y reducir los niveles de colesterol LDL (González et al., 2023). De igual forma, sus probióticos fortalecen la respuesta inmunológica y reducen la incidencia de infecciones respiratorias, mientras

que recientes evidencias sugieren su influencia positiva sobre la salud mental mediante la modulación de la conexión intestino-cerebro (Makino et al., 2020; Patterson et al., 2023).

2.6. Incorporación de ingredientes funcionales en yogur

2.6.1. Efecto en las propiedades sensoriales, fisicoquímicas y reológicas

La modificación de los ingredientes del yogur mediante la incorporación de diversos aditivos es una estrategia fundamental para optimizar sus propiedades fisicoquímicas, reológicas y sensoriales. Específicamente, se ha demostrado que la inclusión de harinas y almidones, como los derivados de papa, camote, maíz, garbanzo, frijol y algunas harinas de orifen fúngico, actúan como un factor determinante en la mejora de la viscosidad y la estabilidad del almacenamiento en yogures batidos sin grasa, al minimizar la sinéresis y fortalecer la estructura del gel debido al contenido de proteína (Alemán et al., 2023). En el caso específico de las harinas de origen fúngico, como las obtenidas de *Hericium americanum*, *Pleurotus ostreatus* y *Agaricus bisporus*, se ha reportado que su elevado contenido de β-glucanos, quitina y proteínas funcionales favorece el aumento de la viscosidad aparente y el comportamiento pseudoplástico del yogur, mejorando su consistencia y estabilidad estructural; estos compuestos actúan como agentes espesantes naturales, capaces de retener agua y de interactuar con las micelas de caseína, lo que se traduce en una textura más firme y homogénea (Pérez-Mateos et al., 2021; Villares et al*.,* 2022).

De forma complementaria, la adición de harina de alcachofa de Jerusalén, rica en inulina, ha sido correlacionada con un aumento de la viscosidad aparente y la firmeza textural del producto, atributos clave que influyen directamente en la percepción del sabor residual por parte del consumidor (Krivorotova et al., 2017). Resultados similares se han observado con harinas fúngicas, donde la mejora de la textura suele compensar posibles notas

terrosas o umami propias del hongo, siempre que se utilicen concentraciones adecuadas (Gómez-García et al., 2020). En un contexto más amplio, la variación en ingredientes como diferentes tipos de leche ya sea entera, baja en grasa o descremada, cultivos probióticos y agentes espesantes o edulcorantes puede modificar los parámetros fisicoquímicos como el pH, la acidez y el contenido de sólidos totales, lo que a su vez impacta directamente en la calidad del gel y las propiedades sensoriales como el sabor, el aroma y la textura, siendo estos últimos decisivos en la aceptación final por parte del consumidor (Saleh A et al., 2020).

Desde el punto de vista fisicoquímico, la adición de harinas fúngicas puede modificar parámetros como el pH, la acidez titulable y el contenido de sólidos totales, influyendo directamente en la cinética de fermentación láctica y en la formación del gel de caseína. Se ha reportado que estos cambios contribuyen a una microestructura más homogénea y compacta, lo cual se asocia con una mayor estabilidad del producto y una textura más cremosa (Pérez-Mateos et al., 2021; Gómez-García et al., 2020). Asimismo, la presencia de fibra dietética y compuestos bioactivos puede mejorar la resistencia del gel frente a esfuerzos de corte, confiriendo un comportamiento reológico pseudoplástico deseable desde el punto de vista tecnológico y sensorial.

En términos funcionales, las harinas de origen fúngico aportan compuestos bioactivos como β-glucanos, polifenoles y proteínas con potencial antioxidante y prebiótico, los cuales pueden favorecer la salud intestinal y potenciar el crecimiento de microorganismos benéficos en el yogur. Estos efectos funcionales incrementan el valor agregado del producto y responden a la creciente demanda de alimentos con beneficios para la salud más allá de la nutrición básica (Villares et al*.,* 2022; Saleh et al*.,* 2020). Además, se ha observado que la incorporación controlada de harinas fúngicas no afecta negativamente la viabilidad de cultivos probióticos, lo que refuerza su aplicación en productos lácteos fermentados funcionales.

Desde la perspectiva sensorial, las mejoras en textura, cremosidad y sensación en boca derivadas de la adición de harinas fúngicas pueden compensar posibles notas sensoriales características del hongo, siempre que se utilicen concentraciones adecuadas. Estudios sensoriales reportan que formulaciones optimizadas presentan una aceptación comparable o superior a la de yogures convencionales, destacando atributos como consistencia, cuerpo y palatabilidad general, los cuales influyen directamente en la intención de compra del consumidor (Krivorotova et al., 2017; Barak et al., 2021).

En este contexto, las harinas de origen fúngico se posicionan como ingredientes innovadores para el desarrollo de yogures, capaces de mejorar la calidad tecnológica, sensorial y funcional del producto final, al tiempo que responden a las tendencias actuales de consumo orientadas hacia alimentos saludables, sostenibles y con valor agregado (Gómez-García et al*.,* 2020; Villares et al*.,* 2022).

2.6.2. **Estudios previos con hongos comestibles y/o medicinales en yogur**

Recientemente la investigación científica se ha centrado en la fortificación del yogur con hongos comestibles, medicinales y funcionales como un medio eficaz para crear productos lácteos fermentados de alto valor funcional y organoléptico, que sean elegidos por los consumidores por sus propiedades funcionales, esta tendencia está impulsada por el perfil bioactivo de los hongos, que incluyen polisacáridos, fibra y compuestos antioxidantes. Específicamente, estudios sobre el hongo *Ganoderma lucidum* (Reishi) han evidenciado que su incorporación, tanto en forma de extracto como de polvo, no solo mejora las propiedades funcionales del yogur posiblemente a través de la sinergia con los cultivos probióticos, sino que también optimiza significativamente sus cualidades texturales y sensoriales, contribuyendo a una mejor aceptación por parte del consumidor (Atik et al*.,* 2024). Dentro de otras investigaciones, también se encuentra la adición del pulverizado de

Lentinula edodes (Shiitake) en el yogur tipo batido, el cual ha demostrado tener un impacto positivo en las características fisicoquímicas, ofreciendo un producto con mayor capacidad antioxidante y perfiles sensoriales mejorados (Zhu et al., 2023). Estos hallazgos se complementan con la inclusión de otros hongos comestibles, como el Maitake, que ha sido reconocido por su potencial como ingrediente funcional capaz de enriquecer la composición nutricional y la estructura del yogur, confirmando la utilidad de la micobiomasa para desarrollar nuevas categorías de yogures con beneficios para la salud (Alemán et al*.,* 2023). Diversas investigaciones científicas han documentado de manera explícita el uso de hongos comestibles y medicinales en forma de harina, polvo o extracto como ingredientes funcionales en yogur y otros productos lácteos fermentados. Por ejemplo, Skiba et al*.* (2025) realizaron una revisión exhaustiva en la que se analiza la fortificación de yogur con hongos comestibles como *Agaricus bisporus* (champiñón de botón), *Lentinula edodes* (shiitake), *Pleurotus ostreatus* (champiñón ostra) y *Flamulina velutipes* (enoki) reportando que la adición de polvos fúngicos mejora la actividad de las bacterias ácido-lácticas, incrementa la viscosidad y la dureza del gel, y reduce la sinéresis, efectos atribuidos principalmente a la presencia de polisacáridos como los β-glucanos y a la capacidad de retención de agua de la fibra fúngica. Asimismo, el uso de *Agaricus bisporus* ha sido explorado en diferentes matrices lácteas; estudios han mostrado que la incorporación de extractos de este hongo en yogur, incluso en forma microencapsulada, permite mantener la estabilidad de los compuestos bioactivos y potenciar la actividad antioxidante durante el almacenamiento (Food Chemistry, 2017). En productos lácteos fermentados distintos al yogur, como el labneh, Sayed et al*.* (2024) reportaron que la suplementación con polvo de *Agaricus bisporus* incrementó los sólidos totales, la acidez y la actividad antioxidante, además de mantener una adecuada aceptación sensorial a bajas concentraciones. En conjunto, estos estudios confirman que la incorporación de harinas o polvos de hongos en productos lácteos fermentados es una estrategia viable y respaldada científicamente para mejorar las propiedades fisicoquímicas,

funcionales y sensoriales, consolidando a los hongos como ingredientes innovadores en el desarrollo de alimentos funcionales.

2.7. **Literatura citada**

Adolfsson, O., Meydani, S. N., & Russell, R. M. (2004). Yogurt and gut function. The American Journal of Clinical Nutrition, 80(2), 245–256. https://doi.org/10.1093/ajcn/80.2.245

Aleman RS, Cedillos R, Page R, Olson D, Aryana K. Physico-chemical, microbiological, and sensory characteristics of yogurt as affected by various ingredients. J Dairy Sci. 2023 Jun;106(6):3868-3883. doi: 10.3168/jds.2022-22622. Epub 2023 Apr 18. PMID: 37080788.

Almjalawi, B. S. A., Chechan, R. A., & Alhesnawi, A. S. M. (2024). Some Applications of *Hericium erinaceus* Mushrooms: A Review. *South Asian Research Journal Of Agriculture And Fisheries*, *6*(05), 92-100. https://doi.org/10.36346/sarjaf.2024.v06i05.002

Atik, A., Atik, İ., Akarca, G., & Denizkara, A. J. (2024). Incorporating Ganoderma lucidum extract and powder with probiotic cultures (Lactobacillus acidophilus and Bifidobacterium animalis subsp. lactis) enhanced the functional, textural, and sensory qualities of yogurt. Journal Of Food Science And Technology, 62(4), 787-798. https://doi.org/10.1007/s13197-024-06068-z

Atila, F. (2019). Lignocellulosic and proximate based compositional changes in substrates during cultivation of *Hericium erinaceus* mushroom. *Scientia Horticulturae*, *258*, 108779. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108779

Ban, H., Du, Q., Zhao, W., Yang, Q., Han, H., Ding, T., Wang, Y., Zhang, X., Li, X., Shi, H., & Chen, J. (2024). Effect of Solid-State Fermentation of *Hericium erinaceus* on the Structure and Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber from Corn Husk. *Foods, 13*(18), 2895. https://doi.org/10.3390/foods13182895

Boddy, L., Crockatt, M. E., & Ainsworth, A. M. (2010). Ecology of Hericium cirrhatum, H. coralloides and *H. erinaceus* in the UK. *Fungal Ecology*, *4*(2), 163-173. https://doi.org/10.1016/j.funeco.2010.10.001

Cesaroni, V., Brusoni, M., Cusaro, C. M., Girometta, C., Perini, C., Picco, A. M., Rossi, P., Salerni, E., & Savino, E. (2019). Phylogenetic Comparison between Italian and Worldwide Hericium Species (Agaricomycetes). *International Journal Of Medicinal Mushrooms*, *21*(10), 943-954. https://doi.org/10.1615/intjmedmushrooms.2019032561

Chaiyasut, C., Kadkhodai, F., Sirilun, S., Lailerd, N., Naktubtim, K., & Suttajit, M. (2018). *Lactobacillus fermentum* HP3–Mediated Fermented *Hericium erinaceus* Juice as a Health-Promoting Food Supplement to Manage Diabetes Mellitus. *Journal of Evidence-Based Integrative Medicine, 23*. https://doi.org/10.1177/2515690X18765699

Cheng, P.-Y., Liao, H.-Y., Kuo, C.-H., & Liu, Y.-C. (2021). Enhanced Erinacine A production by *Hericium erinaceus* using solid-state cultivation. *Fermentation*, *7*(3), 182. https://doi.org/10.3390/fermentation7030182

Chutimanukul, P., Phatthanamas, W., Thepsilvisut, O., Chantarachot, T., Thongtip, A., & Chutimanukul, P. (2023). Commercial scale production of Yamabushitake mushroom (*Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. 1797) using rubber and bamboo sawdust substrates in tropical regions. *Scientific Reports*, *13*(1), 13316. https://doi.org/10.1038/s41598-023-40601-y

Colegio de Postgraduados, Centro de Biotecnología de Hongos Comestibles, Funcionales y Medicinales. (s.f.). *Productos y Servicios - HONGOS MEDICINALES Y TU SALUD*. Recuperado el [Día, Mes, Año en que se consultó] de https://hongosmedicinalesytusalud-cb-hcfm.com/productosyservicios9.php

Contato, A. G., & Conte-Junior, C. A. (2025). Mushrooms in innovative food products: challenges and potential opportunities as meat substitutes, snacks and functional beverages. *Trends In Food Science & Technology*, 104868. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104868

Deep processing and comprehensive utilisation of edible mushroom resources. (2024). *International Journal of Food Science & Technology, 59*(12), 9559–9561. https://doi.org/10.1111/ijfs.17502

Doar, E., Meyer, K. W., Bair, Z. J., Nally, R., McNalley, S., Davis, R., & Beathard, C. (2025). Influences of substrate and tissue type on erinacine production and biosynthetic gene expression in *Hericium erinaceus*. *Fungal Biology and Biotechnology*, *12*(1), 4. https://doi.org/10.1186/s40694-025-00194-9

Edible Mushrooms as a Nutrient-Rich Ingredient for Healthier Food Products: A Review. (2023). *Foods, 12*(12), 2297. https://doi.org/10.3390/foods12122297

Froiio, F., Cristiano, M. C., Mancuso, A., Iannone, M., & Paolino, D. (2020). Vegetable-Milk-Based Yogurt-Like Structure: Rheological Properties Influenced by Gluten-Free Carob Seed Flour. Applied Sciences, 10(19), 6963. https://doi.org/10.3390/app10196963

Fungal Growth Inhibition by Cheese Prepared Using Milk-clotting Crude Enzymes from the Edible Mushroom *Hericium erinaceus* MAFF 435060. (2020). *Food*

Science and Technology Research, 26(1), 26–33. https://doi.org/10.3136/fstr.26.26

Gąsecka, M., Siwulski, M., Magdziak, Z., Budzyńska, S., Stuper-Szablewska, K., Niedzielski, P., & Mleczek, M. (2019). The effect of drying temperature on bioactive compounds and antioxidant activity of Leccinum scabrum (Bull.) Gray and *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. Journal Of Food Science And Technology, 57(2), 513-525. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04081-1

Ge, F., Chen, Y., Wang, B., Zhou, W., Du, B., & Hou, L. (2025). Bioactive Polysaccharides from *Hericium erinaceus:* Extraction, Structure, Bioactivities, and Applications. Molecules, 30(8), 1850. https://doi.org/10.3390/molecules30081850

Gilbert, A., Rioux, L.-E., St-Gelais, D., & Turgeon, S. L. (2020). Studying stirred yogurt microstructure using optical microscopy: How smoothing temperature and storage time affect microgel size related to syneresis. Journal of Dairy Science, 103(3), 2139–2152. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16787

Gonkhom, D., Luangharn, T., Stadler, M., & Thongklang, N. (2024). Cultivation and Nutrient Compositions of Medicinal Mushroom, *Hericium erinaceus* in Thailand. Chiang Mai Journal Of Science, 51(2), 1-10. https://doi.org/10.12982/cmjs.2024.028

Gravina, A. G., Pellegrino, R., Romano, M., Auletta, S., Palladino, G., Brandimarte, G., D'Onofrio, R., Arboretto, G., Imperio, G., Ventura, A., & Federico, A. (2023). *Hericium erinaceus*, a medicinal fungus with a centuries-old history: Evidence in gastrointestinal diseases. *World Journal of Gastroenterology, 29*(20), 3048–3065. https://doi.org/10.3748/wjg.v29.i20.3048

Gu, H., Huang, R., Xu, J., He, J., Wang, Z., & Fan, D. (2024). Preparation, characterization, and property evaluation of *Hericium erinaceus* peptide–calcium chelate. *Frontiers in Nutrition, 10*. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1337407

Guénard-Lampron, V., St-Gelais, D., Villeneuve, S., & Turgeon, S. L. (2020). Short communication: Effect of stirring operations on changes in physical and rheological properties of nonfat yogurts during storage. Journal of Dairy Science, 103(1), 210–214. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16434

Harikrishnan, R., Kim, J., Kim, M., Balasundaram, C., & Heo, M. (2011). Hericium erinaceum enriched diets enhance the immune response in Paralichthys olivaceus and protect from Philasterides dicentrarchi infection. *Aquaculture*, *318*(1-2), 48-53. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.04.048

He, X., Wang, X., Fang, J., Chang, Y., Ning, N., Guo, H., Huang, L., Huang, X., & Zhao, Z. (2017). Structures, biological activities, and industrial applications of

the polysaccharides from *Hericium erinaceus* (Lion's Mane) mushroom: A review. *International Journal Of Biological Macromolecules*, *97*, 228-237. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.040

Heleno, S. A., Barros, L., Martins, A., Queiroz, M. J. R., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., & Ferreira, I. C. (2015). Chemical composition, antioxidant activity and bioaccessibility studies in phenolic extracts of two Hericium wild edible species. LWT, 63(1), 475-481. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.040

Jahedi, A., Ahmadifar, S., & Mohammadigoltapeh, E. (2023). Revival of wild edible-medicinal mushroom (Hericium erinaceus) based on organic agro-industrial waste- achieving a commercial protocol with the highest yield; optimum reuse of organic waste. Scientia Horticulturae, 323, 112510. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112510

Jiang, S., Wang, Y., & Zhang, X. (2016). Comparative studies on extracts from *Hericium erinaceus* by different polarity reagents to gain higher antioxidant activities. *Experimental and Therapeutic Medicine, 12*(1), 513–517. https://doi.org/10.3892/etm.2016.3279

Kałucka, IL y Olariaga Ibarguren, I. (2019). *Hericium erinaceus*. Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN 2019: e.T70401627A70401637. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-3.RLTS.T70401627A70401637.en

Krivorotova, T., Sereikaite, J., & Glibowski, P. (2017). Rheological and textural properties of yogurts enriched with Jerusalem artichoke flour. Czech Journal Of Food Sciences, 35(5), 432-439. https://doi.org/10.17221/2/2017-cjfs

Kunca, V., & Čiliak, M. (2017). Habitat preferences of *Hericium erinaceus* in Slovakia. *Fungal Ecology*, *27*, 189-192. https://doi.org/10.1016/j.funeco.2016.12.002

Lazur, J., Kała, K., Krakowska, A., Sułkowska-Ziaja, K., Szewczyk, A., Piotrowska, J., Rospond, B., Fidurski, M., Marzec, K., & Muszyńska, B. (2024). Analysis of bioactive substances and essential elements of mycelia and fruiting bodies of Hericium spp. Journal Of Food Composition And Analysis, 127, 105981. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.105981

Le Ba, T., Dam, M. S., Nguyen, L. L. P., Baranyai, L., & Kaszab, T. (2025). A Review of Processing Techniques and Rheological Properties of Yogurts. Journal of Texture Studies, 56(2), e70006. https://doi.org/10.1111/jtxs.70006

Liu, J.-H., Li, L., Shi, S.-S., Wu, W.-B., Yang, Y., & Xu, Z.-Y. (2016). Anti-*Helicobacter pylori* activity of bioactive components isolated from *Hericium erinaceus*. *Journal of Ethnopharmacology, 182*, 162–167. https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.09.049

Liu, M., Liu, L., Song, X., Zhou, Y., Peng, Y., Xie, C., & Gong, W. (2024). Isolation and evaluation of erinacine A contents in mycelia of *Hericium erinaceus* strains. *Foods, 13*(11), 1649. https://doi.org/10.3390/foods13111649

López-Cardoso, F., Ontiveros-Apodaca, N., Gutiérrez-Grijalva, E. P., Arámburo-Gálvez, J. G., Figueroa-Salcido, O. G., Leyva-López, N., Gastélum-Chavira, D. A., Cárdenas-Torres, F. I., & Heredia, J. B. (2024). Preferencia de consumo de alimentos funcionales en Culiacán, México. Salud Pública de México, 67(1), 28-38. https://doi.org/10.21149/15741

Lu, Z., Liu, L., Ren, Z., Hu, S., Wang, Y., Ji, S., Wang, X., Du, Z., Liu, Y., Yang, Y., & Yu, Y. (2024). Optimization of substrate formulation for *Hericium erinaceus* by replacing wood by straw and their effect on enzyme activities. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1436385. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1436385

Ma, B. J., Shen, J. W., Yu, H. Y., Ruan, Y., Wu, T. T., & Zhao, X. (2010). Hericenones and erinacines: stimulators of nerve growth factor (NGF) biosynthesis in *Hericium erinaceus*. *Mycology: An International Journal on Fungal Biology, 1*(2), 92–98. https://doi.org/10.1080/21501201003735556

Makino, S., Ikegami, S., Kurokawa, M. (2020). Protective effects of fermented milk containing Lactobacillus casei strain Shirota on common cold and flu. Nutrients, 12(10), 3000. https://doi.org/10.3390/nu12103000

Martínez-Mármol, R., Chai, Y., Conroy, J. N., Raftery, M. J., Ramer, M. S., & Al-Hassani, H. (2023). Hericerin derivatives activate a pan-neurotrophic pathway and enhance memory in mice. *Journal of Neurochemistry, 157*(1), 20–35. https://doi.org/10.1111/jnc.15767

Montemurro, M., Verni, M., Rizzello, C. G., & Pontonio, E. (2023). Design of a Plant-Based Yogurt-Like Product Fortified with Hemp Flour: Formulation and Characterization. Foods, 12(3), 485. https://doi.org/10.3390/foods12030485

Páez-Olivan, L. A., Correa-Ramírez, M., Guzmán-Dávalos, L., Naranjo-Jiménez, N., Almaraz-Abarca, N., Ávila-Reyes, J. A., Herrera-Gamboa, J., Medina, I. R.,
González-Valdez, L. S., & Torres-Ricario, R. (2022). STUDIES OF MORPHOLOGICAL AND GENETIC VARIABILITY OF *HERICIUM ERINACEUS* FROM THE NORTHWEST AREA OF THE SIERRA MADRE OCCIDENTAL, DURANGO, MEXICO. *The Southwestern Naturalist*, *66*(3). https://doi.org/10.1894/0038-4909-66.3.225

Páez-Olivan, L., Quiñones, C., Naranjo, N., Torres, R., Correa-Ramírez, M., & Herrera, J. (2024). Biological efficiency and evaluation of bioactive compounds of wild mexican strains of Hericium erinaceus. *Revista de la Facultad de Agronomía*, *41*(2), e244120. https://doi.org/10.47280/revfacagron(luz).v41.n2.10

Patterson, E., O'Sullivan, O., & Ross, R. P. (2023). The gut-brain axis: Effects of fermented dairy on mood and cognition. Frontiers in Psychiatry, 14, 1189432. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2023.1189432

Rangel-Vargas, E., García-Pérez, J. V., Rangel-Vargas, N. E., Herrera-González, J. A., Melgarejo-Flores, A., Cerna-Cortez, J. F., & Hernández-López, M. (2021). Edible Mushrooms as a Natural Source of Food Ingredient/Additive Replacer. *Foods, 10*(11), 2687. https://doi.org/10.3390/foods10112687

Rheology and in vitro digestion of protein-rich *Hericium erinaceus* milk. (2024). *Food Chemistry, 444*, 138670. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138670

Saleh A, Mohamed AA, Alamri MS, Hussain S, Qasem AA, Ibraheem MA. Effect of Different Starches on the Rheological, Sensory and Storage Attributes of Non-fat Set Yogurt. Foods. 2020 Jan 7;9(1):61. doi: 10.3390/foods9010061. PMID: 31936051; PMCID: PMC7023355.

Soybean fermentation with basidiomycetes (medicinal mushroom mycelia). (2020). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 7*(1), 23. https://doi.org/10.1186/s40538-020-00120-7

Spangenberg, E. T., Moneypenny, A., Bozzo, G. G., & Perreault, M. L. (2025). Unveiling the role of erinacines in the neuroprotective effects of *Hericium erinaceus*: A systematic review in preclinical models. *Frontiers in Pharmacology, 16*. https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1582081

Tachabenjarong, N., Rungsardthong, V., Ruktanonchi, U., Poodchakarn, S., Thumthanaruk, B., Vatanyoopaisarn, S., Suttisintong, K., Iempridee, T., & Uttapap, D. (2022). Bioactive compounds and antioxidant activity of Lion's Mane mushroom (*Hericium erinaceus*) from different growth periods. E3S Web Of Conferences, 355, 02016. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235502016

The role of microorganisms and microbial enzymes in commercial fermented mushroom production: a comprehensive review of their action mechanisms, quality attributes and health benefits. (2025). *Food Production, Processing and Nutrition, 7*(1), 8. https://doi.org/10.1186/s43014-025-00213-3

Tovar, A. R., & Herrera, G. (2017). Introduction to the Yogurt in Nutrition Initiative at the First Symposium of Yogurt in Mexico: The Balanced Diet Initiative. Advances in Nutrition, 8(Suppl), 144S-145S. https://doi.org/10.3945/an.115.011163

Walde, S., Velu, V., Jyothirmayi, T., & Math, R. (2005). Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom. Journal Of Food Engineering, 74(1), 108-115. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.02.008

Wang, J., Liu, T., Zhang, P., Wang, P., Yang, C., & Zhang, Y. (2024). Uncovering hericenones from the fruiting bodies of *Hericium erinaceus* through interdisciplinary collaboration. *Journal of Natural Products, 88*(1), 1–8. https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.4c01018

Woraharn, S., Pongsapich, T., Preez, J. C., & Wiroon-Chai, W. (2015). Development of fermented *Hericium erinaceus* juice with high content of L-glutamine and L-glutamic acid. *International Journal of Food Science & Technology, 50*(9), 2104–2113. https://doi.org/10.1111/ijfs.12879

Yang, T., Chen, Y., Fan, Y., Luo, S., He, Y., Xu, C., & Zhang, Y. (2021). Effect of Pretreatment Processes on Biogenic Amines Content and Some Bioactive Compounds in Hericium erinaceus Extract. Molecules, 26(9), 2686. https://doi.org/10.3390/molecules26092686

Yogurt in Nutrition Initiative (YINI). (2023). The role of yogurt in gut microbiota modulation and metabolic health. Advances in Nutrition, 14(4), 987–1002. https://doi.org/10.1093/advances/nmad038

Zhu, H., Chen, Z., Li, G., Yao, X., Hu, Y., & Zhao, W. (2023). Physicochemical, sensory, and antioxidant characteristics of stirred-type yogurt enriched with Lentinula edodes stipe powder. Food Science & Nutrition, 11(10), 6231-6240. https://doi.org/10.1002/fsn3.3563

3. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA, FUNCIONAL Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE LA HARINA DE *Hericium erinaceus*

3.1. Resumen

El análisis en la harina de *Hericium erinaceus* mostró que su composición proximal se caracteriza por baja humedad (9.79 ± 0.03 %), proteína cruda (14.84 ± 0.07 %), fibra cruda (17.15% ± 0.01) y carbohidratos predominantes (49.69 ± 0.46 %), además de cenizas moderadas y bajo extracto etéreo, confirmando su valor nutricional y su potencial como ingrediente alimentario funcional. La cuantificación de β-glucanos (81.02 ± 0.72 %) evidenció una alta concentración de polisacáridos bioactivos, consistente con reportes previos tras procesos de purificación. Respecto a las propiedades funcionales, se observó un PH (5.92 ± 0.19 g/g^{-1}), CUG de 3.18 ± 0.01 %, AE elevada (84.13 ± 0.11 %) y EE de 56.55 ± 0.15 %, lo que sugiere buen desempeño en sistemas alimentarios como emulsiones y matrices lácteas. Estas propiedades se atribuyen principalmente a su contenido de proteínas y polisacáridos estructurales, especialmente β-glucanos. Finalmente, la actividad antioxidante fue alta, con inhibición de 81.09 ± 0.92 % ($ABTS^{\bullet+}$) y 85.14 ± 1.24 % ($DPPH^{\bullet+}$), indicando una fuerte capacidad de neutralización de radicales libres asociada a compuestos fenólicos y polisacáridos. En conjunto, los resultados confirman que *Hericium erinaceus* posee un perfil fisicoquímico y funcional adecuado para su uso como ingrediente innovador en el desarrollo de alimentos funcionales con valor agregado. Asimismo, las variaciones observadas frente a otros estudios pueden atribuirse a factores de cultivo, secado y extracción, reforzando la importancia de estandarizar procesos para optimizar su aprovechamiento industrial y garantizar consistencia en sus propiedades funcionales y nutracéuticas en diferentes aplicaciones alimentarias y biotecnológicas emergentes de alto valor agregado actual.

Palabras clave: Harina, *Hericium erinaceus*, β-glucanos, propiedades funcionales, actividad antioxidante, composición proximal, alimentos funcionales.

Tesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Ana Bethsi Hernández Rivera
Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

PHYSICOCHEMICAL, FUNCTIONAL CHARACTERIZATION AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF *Hericium erinaceus* FLOUR

Abstract

The analysis of *Hericium erinaceus* flour showed that its proximal composition is characterized by low moisture (9.79 ± 0.03 %), crude protein (14.84 ± 0.07 %), crude fiber (17.15 ± 0.01 %), and predominant carbohydrates (49.69 ± 0.46 %), in addition to moderate ash content and low ether extract, confirming its nutritional value and its potential as a functional food ingredient. The quantification of β-glucans (81.02 ± 0.72 %) evidenced a high concentration of bioactive polysaccharides, consistent with previous reports after purification processes. Regarding the functional properties, a SP of 5.92 ± 0.19 g/g-1, FBC of 3.18 ± 0.01 %, high EA (84.13 ± 0.11 %), and ES of 56.55 ± 0.15 % were observed, suggesting good performance in food systems such as emulsions and dairy matrices. These properties are mainly attributed to its protein content and structural polysaccharides, especially β-glucans. Finally, antioxidant activity was high, with inhibition values of 81.09 ± 0.92 % (ABTS•+) and 85.14 ± 1.24 % (DPPH•+), indicating a strong free radical scavenging capacity associated with phenolic compounds and polysaccharides. Overall, the results confirm that *Hericium erinaceus* possesses an adequate physicochemical and functional profile for its use as an innovative ingredient in the development of value-added functional foods. Likewise, the variations observed compared to other studies may be attributed to cultivation, drying, and extraction factors, reinforcing the importance of standardizing processes to optimize its industrial utilization and guarantee consistency in its functional and nutraceutical properties in different emerging food and biotechnological applications with high added value today.

Keywords: Flour, *Hericium erinaceus,* β-glucans, functional properties, antioxidant activity, proximal composition, functional foods

---

Thesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Ana Bethsi Hernández Rivera
Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

3.2. **Introducción**

En los últimos años, el interés por *Hericium erinaceus* ha incrementado considerablemente debido a sus propiedades nutricionales, funcionales y terapéuticas. Este hongo comestible y medicinal, ha sido ampliamente estudiado por su contenido de compuestos bioactivos como β-glucanos, polisacáridos, hericenonas y erinacinas, los cuales han sido asociados con actividades antioxidantes, antiinflamatorias, inmunomoduladoras y neuroprotectoras (Friedman, 2015; Li et al., 2018). La creciente demanda de ingredientes naturales con beneficios nutracéuticos ha impulsado la incorporación de especies de hongos como *Hericium erinaceus* en distintas matrices alimentarias, sin embargo aún es limitada. La importancia de los hongos radica en su contenido de compuestos bioactivos, entre ellos polisacáridos, terpenos, fibra y proteína, los cuales han sido relacionados con actividades antioxidantes, antimicrobianas, inmunomoduladoras y anticancerígenas (Ślusarczyk et al., 2021).

Diversos estudios han señalado que *Hericium erinaceus* contiene metabolitos secundarios capaces de estimular la síntesis del factor de crecimiento nervioso, lo que ha promovido investigaciones relacionadas con la prevención de enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer y Parkinson (Thongbai et al., 2015). Además, sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas han favorecido su incorporación en distintas matrices alimentarias con el propósito de mejorar sus características funcionales y nutracéuticas (Kour et al., 2022). Por ello, las investigaciones actuales se han enfocado en evaluar su incorporación en alimentos funcionales para clasificarlos como alimentos con valor agregado, con la finalidad de incrementar su valor nutricional y promover el desarrollo de productos innovadores que contribuyan a la salud del consumidor y al aprovechamiento sustentable de recursos naturales.

Entre sus características tecnofuncionales más destacadas se encuentra su capacidad de retención de agua y de aceite, la cual está estrechamente relacionada con su contenido de polisacáridos estructurales y fibra dietética;

estas propiedades permiten mejorar la hidratación de las matrices alimentarias, incrementar la viscosidad y favorecer la estabilidad de sistemas semisólidos (Phat et al., 2014; Yuan et al., 2025). Otra propiedad funcional importante es su capacidad gelificante y de modificación reológica, ya que sus β-glucanos pueden interactuar con el agua formando redes tridimensionales que contribuyen a mejorar la textura, consistencia y sensación en boca de los alimentos (Zhu et al., 2023). Adicionalmente, su actividad antioxidante no solo aporta beneficios nutracéuticos, sino que también contribuye a la estabilidad tecnológica del producto al disminuir procesos de oxidación lipídica, prolongando la vida útil de los alimentos (Jabłońska-Ryś, 2025). De manera general estas propiedades funcionales hacen de *Hericium erinaceus* sea un ingrediente versátil con potencial para mejorar tanto la calidad sensorial como la estabilidad física de diversas matrices alimentarias, lo que explica su creciente interés en el desarrollo de alimentos innovadores con valor agregado.

3.3. **Materiales y métodos**

En la Figura 1 se muestra la estrategia experimental utilizada para la realización del presente trabajo.

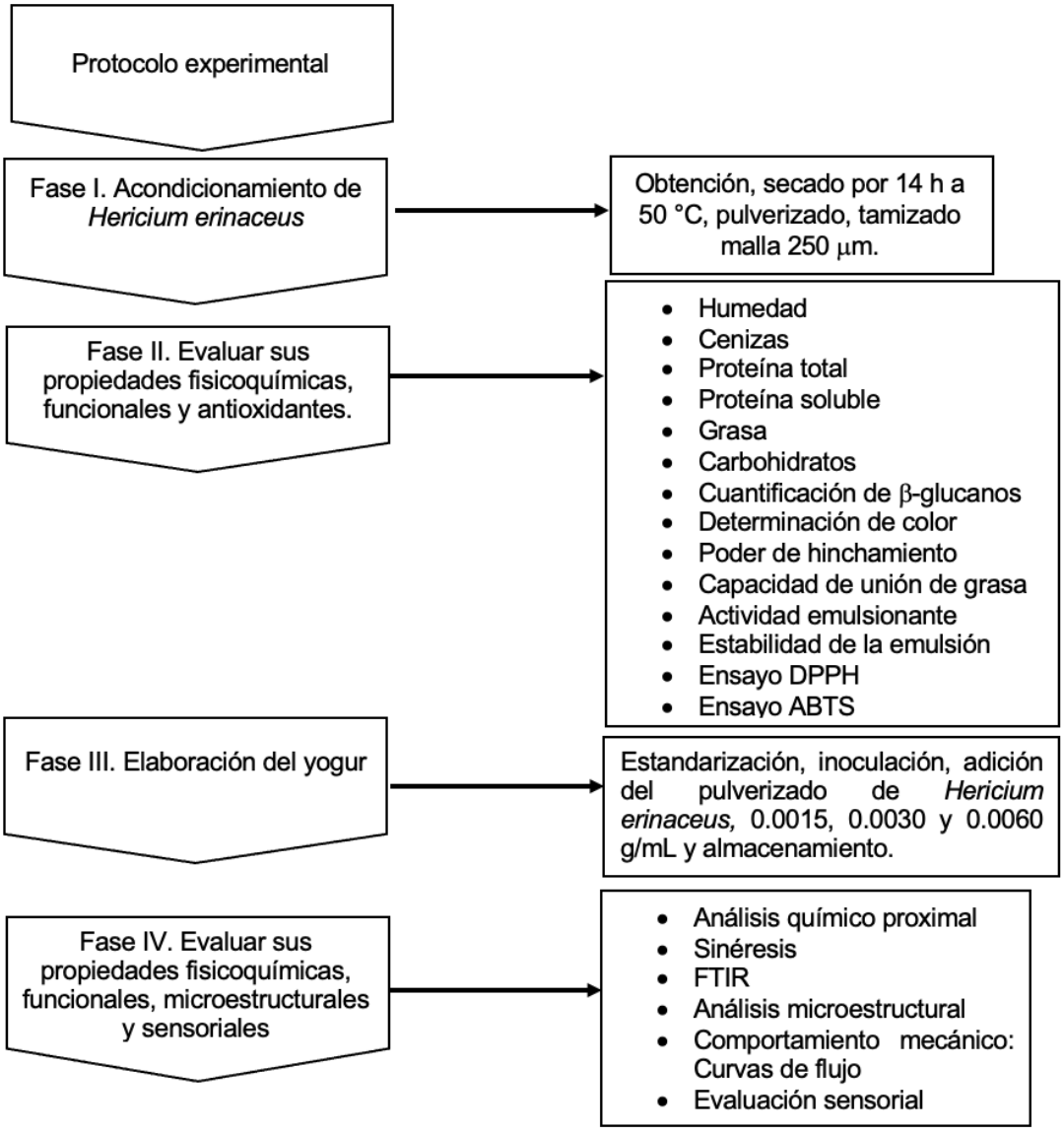


Figura 1. Diagrama esquemático de la estrategia experimental.

3.3.1. **Ubicación del trabajo**

El acondicionamiento y caracterización del pulverizado de *Hericium erinaceus*, así como la elaboración y análisis del yogur se efectuó en el

Laboratorio de Tecnología de Alimentos pertenecientes al Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.3.2. **Materiales**

El hongo *Hericium erinaceus* se adquirió en el Centro de biotecnología de hongos comestibles, funcionales y medicinales, Colegio de Postgraduados Campus Puebla, (coordenadas GPS 19°06'52.5" N 98°14'40.4" O, con una elevación sobre el nivel del mar de 2,200 m). El hongo se almacenó envuelto en papel dentro de un tóper con tapa hermética a 4 °C. Los reactivos usados fueron de grado analítico: etanol al 95 % (v/v), hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) y ácido acético (CH_3COOH) fueron adquiridos en Química Laitz S.A. de C.V. (Ciudad de México, México). Reactivo de Folin-Ciocalteu (FRC), radical libre 1,1- Difenil-2-picrilhidrazilo (DPPH), KIT de Glucosa Hexoquinasa HK) (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemania), metanol, radical del ácido 2,2 azinobis-(-3- etilbenzotiazolina)-6-sulfonico (ABTS), persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$), ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido trifluoroacético ($C_2HF_3O_2$), ácido bórico (H_3BO_3), ácido clorhídrico (HCl), carbonato de sodio (Na_2CO_3), tartrato de sodio y potasio tetrahidratado ($C_4H_4KNaO_6.4H_2O$), sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4.5H_2O$), rojo de metilo ($C_{15}H_{15}N_3O_2$), azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3SCl$), dodecil sulfato de sodio (SDS), tabletas catalizadoras (Kjeldahl) y albúmina de suero bovino (ASB), fueron adquiridos en Sigma-Aldrich Química, S.A. de C.V. (Ciudad de México, México). Se utilizó agua destilada en todos los experimentos.

3.3.3. **Acondicionamiento de *Hericium erinaceus***

3.3.3.1. **Deshidratación**

Los cuerpos fructíferos de *Hericium erinaceus* se fragmentaron en trozos de 1 a 3 cm y fueron secados a 50 ± 1 °C durante 14 h en un horno de aire caliente Riossa Digital (HCF-62, Riossa Digital, México), hasta obtener una humedad de 9.9 ± 0.3 %. Los fragmentos de los cuerpos fructíferos secos se trituraron en un equipo Nutribullet (127V, Nutribullet, China) operada a 600 W, posteriormente se sometieron a un tamizado en malla de 250 µm). El

pulverizado se conservó en una bolsa hermética, envuelto con papel aluminio para proteger de la luz directa, el pulverizado se almacenó en refrigeración 10 °C hasta su análisis (Xue et al., 2019; Chirapongsatonkul et al., 2019).

3.3.4. **Caracterización fisicoquímica de *Hericium erinaceus***

3.3.4.1. **Análisis químico proximal**

3.3.4.1.1. **Determinación de humedad**

Se evaporó de manera continua la humedad de la muestra con una termobalanza Ohaus MB-45 (Ohaus Corporation, EE. UU.) y se registró la pérdida de peso hasta que la muestra se situó a peso constante (Nollet, 1996; AOAC 1996). El porcentaje de humedad en base seca se calculó mediante la Ecuación 1.

$$\%Hbs = \frac{m\ Agua}{ms} * 100 \ldots\ldots\ldots \textbf{(Ec. 1)}$$

Donde mAgua= masa de agua que contiene la muestra; ms= masa inicial de la muestra.

3.3.4.1.2. **Determinación de cenizas**

La concentración de cenizas se determinó en 1 g de muestra y se colocó en crisoles a peso constante, las muestras se incineraron en una mufla Felisa (Equipar S.A. de C.V., México) a 450 °C durante 6 horas, para asegurar la eliminación total de materia orgánica. Las cenizas obtenidas se enfriaron en un desecador y se pesaron. (Nollet, 1996). Los resultados se calcularon mediante la Ecuación 2.

$$\%Cenizas = \frac{P3-P1}{P2-P1} * 100 \ldots\ldots\ldots (\textbf{Ec. 2})$$

Donde: p1= peso del crisol vacío (g); p2= peso del crisol con la muestra (g); p3= peso del crisol con cenizas (g).

3.3.4.1.3. **Determinación de proteína total**

Para determinar la concentración de proteína total se siguió el método de Kjeldahl. Se colocaron 0.3 g de muestra en tubos de digestión con 14 mL de solución de ácido sulfúrico (98 % v/v) y 2 tabletas catalizadoras. Las muestras se digirieron durante 5 h a 230 °C en un digestor Foss-Kjeltec (8100, FROSS, China). Posteriormente, se añadieron 50 mL de NaOH 40 % (v/v) amoníaco se recuperó en un matraz Erlenmeyer con 30 mL de solución de ácido bórico (4 % p/v) y 3 gotas de indicador (rojo de metilo en etanol al 0.1 % (p/v) y azul de metileno en agua 0.1 % (v/v), en una relación 1:1. El destilado se tituló con HCl 0.1 N. El contenido de proteína de la muestra se calculó multiplicando el contenido de nitrógeno total por el factor de conversión 6.25 (AOAC, 1996).

3.3.4.1.4. **Determinación de proteína soluble por el método de Lowry**

Se empleó el método de Lowry modificado por por Peterson (1977) con modificaciones. Se prepararon las soluciones base (A y B). La solución A consistió en volúmenes iguales de tres soluciones (S1-NaOH 0.8 N, S2-SDS al 10 % y S3 fue una mezcla de carbonato de sodio al 10 % con tartrato de sodio, potasio tetrahidratado y sulfato de cobre). La solución B fue Folin Ciocalteu-fenol 0.3 N. Se añadieron 980 µL de agua destilada a 20 µL de extracto (0.1 mg mL), seguido de 1000 µL de la solución A. Después de 10 min en la oscuridad, se agregaron 500 µL de la solución B y se midió la absorbancia a 750 nm en un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, Estados Unidos).

3.3.4.1.5. **Determinación de grasa**

Se utilizó un cartucho de papel filtro que contenía 40 g de harina, el desengrasado se realizó durante 5 h en un equipo Soxhlet con 150 mL de hexano a 180 °C. Posteriormente la harina de se dejó en una campana de flujo laminar (RDM, LF-102P, Midland, Ontario, Canadá) por 2 h, con el propósito evaporar el hexano (AOAC, 1996).

3.3.4.1.6. **Determinación de carbohidratos**

Los carbohidratos fueron calculados por diferencia de peso (Castro-Alves & Do Nascimiento, 2016) como se muestra en la Ecuación 3.

$$\%\,\text{Carbohidratos} = 100 - (\%\,\text{proteína} + \%\,\text{fibra} + \%\,\text{cenizas} + \%\,\text{lípidos}) \quad \text{(Ec. 3)}$$

3.3.4.2. **Extracción, purificación y cuantificación de β-glucano**

La extracción de polisacáridos crudos se realizó a partir de harina de *Hericium erinaceus*. Para ello, se mezclaron 3.3 g de harina con 100 mL de agua destilada y la mezcla se mantuvo a 50 ± 1 °C durante 1.5 h bajo agitación constante. Posteriormente, se añadieron 100 mL de etanol al 95 % (v/v) para favorecer la precipitación de los polisacáridos. La mezcla se almacenó a 4 ± 1 °C durante 20 h y, posteriormente, se centrifugó a 8000 rpm durante 20 min en una centrífuga refrigerada (5810 R, Eppendorf, AG, Hamburgo, Alemania) a 10 ± 1 °C. El precipitado obtenido se secó a 40 ± 1 °C durante 2 h (Chirapongsatonkul et al., 2019).

La purificación de la fracción de polisacáridos se realizó con base en las metodologías descritas por Maity et al. (2017) y Morales et al. (2019), con modificaciones. Los polisacáridos recuperados se sometieron a un tratamiento alcalino con NaOH 0.01 M durante 1 h. Posteriormente, la mezcla se enfrió a 4 ± 1 °C y se centrifugó a 8000 rpm durante 20 min en una centrífuga refrigerada a 10 ± 1 °C. El sobrenadante se neutralizó con ácido acético al 20 % (p/v) y se dializó durante 24 h mediante una membrana de celulosa, utilizando agua destilada como líquido dializador. Finalmente, la fracción recuperada se lavó dos veces con agua destilada, se secó a 40 ± 1 °C durante 2.5 h y se pulverizó para su posterior análisis.

El contenido de β-glucanos (%) se determinó mediante el kit Megazyme D-Glucose (GOPOD Format) Assay Kit K-GLUC (Megazyme, Bray Business Park, Bray, Irlanda), basado en una reacción enzimática colorimétrica. Los reactivos se

prepararon de acuerdo con las instrucciones del fabricante, incluida la reconstitución del reactivo GOPOD. Para el análisis, se pesaron 20 mg de muestra y se hidrolizaron con 3 mL de ácido trifluoroacético (TFA) al 72.5 % (p/p). Las muestras se colocaron en un baño de agua a 90 ± 1 °C durante 3 h. Una vez concluida la hidrólisis, las muestras se neutralizaron con NaOH 1 N, se ajustaron a un volumen final de 100 mL con agua destilada y se filtraron a través de un filtro de nailon con un tamaño de poro de 0.45 µm (Freimund et al., 2004). Posteriormente, se prepararon los ensayos de las muestras hidrolizadas en microtubos estériles de 2 mL, de acuerdo con las cantidades y condiciones indicadas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Concentraciones empleadas para la determinación de glucosa.

Tubo	**Blanco de reactivo**	**Estándar**	**Muestra de β-glucanos**
Reactivo GOPOD	3.0 mL	3.0 mL	3.0 mL
Estándar	-	0.1 mL	-
Muestra	-	-	0.1 mL
Agua destilada	0.1 mL	-	-

La mezcla de cada tubo fue mezclada en un vórtex a 6000 rpm durante 10 s. Posteriormente, los tubos fueron incubados a 33 ± 2 °C por 15 min. La cuantificación de β-glucanos se determinó al medir la absorbancia de cada ensayo a 510 nm en un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, EE. UU.). Los cálculos se realizaron de acuerdo con las Ecuaciones 4 y 5.

$$\text{Total Blanco} = \text{Blanco muestra} + \text{Blanco KIT} \quad \textbf{(Ec. 4)}$$

$$\%\,\beta\text{-glucanos} = (\Delta A)(TV)(PM\ Glucosa)(F)/(\epsilon)(d)(SV)(1000)*100 \quad \textbf{(Ec. 5)}$$

Donde: ΔA = Vaciarión de la absorbancia calculada en la Ec. 4; TV = Volumen total del ensayo (mL); $PM\ Glucosa$ = Peso molecular de la glucosa (µg/µmol); F = Factor de dilución de la muestra; ϵ = Coeficiente de extinción milimolar para reactivo GOPOD (6.58 Mm^{-1} cm^{-1}); d = Recorrido de luz (1 cm); SV = Volumen de la muestra (mL); 1000 = Factor de conversión de µg a mg.

3.3.4.3. **Determinación de color**

El color se determinó a temperatura ambiente (22 ± 1 °C) en 10 g del pulverizado en cajas Petri de 5 cm de diámetro empleando un colorímetro CR-400 (Konika Minolta, Inc., Tokio, Japón) en un ángulo de 10 grados. Las coordenadas CIE (Colorimetric Committee 1974) L, a* y b* fueron registradas donde L corresponde a la luminosidad, a* representa la escala de verde (- a) a rojo (+ a) y b* la escala de azul (- b) a amarillo (+ b) (Korley et al., 2015).

3.3.5. **Propiedades funcionales**

3.3.5.1. **Poder de hinchamiento**

0.3 g de pulverizado se dispersaron en 10 mL de agua destilada durante 1 h. Posteriormente, las dispersiones fueron colocadas en un baño de agua a 70 ± 1 °C durante 10 min y en seguida a 95 ± 3 °C por 10 min, finalmente las muestras se centrifugaron a 4600 rpm por 4 min a 23 ± 1 ° C en una centrífuga refrigerada 5810R (Eppendorf, AG, Hamburgo, Alemania). El poder de hinchamiento se expresó como la relación entre el peso precipitado húmedo y el peso de la muestra seca (g g-1) de acuerdo con la Ecuación 6 (Bae-IY et al., 2009).

$$PH\ (g\ g{-}1) = \left(\frac{Peso\ de\ la\ muestra\ húmeda}{Peso\ de\ la\ muestra\ seca}\right) \text{…….} \ (\textbf{Ec. 6})$$

3.3.5.2. **Capacidad de la unión de la grasa (CUG).**

Se prepararon dispersiones al 2 % (p/v) del pulverizado en aceite de soya (Nutrioli, Ragasa Industrias, S.A. de C.V., México), posteriormente las dispersiones se centrifugaron a 2060 rpm por 30 min en una centrífuga refrigerada 5810R (Eppendorf, AG, Hamburgo, Alemania). La cantidad de

aceite retenido en la muestra se obtuvo al determinar el peso del precipitado como se describe en la Ecuación 7 (Lin y Humbert, 1974).

$$\%\ CUG = \left(\frac{Peso\ de\ la\ muestra\ más\ aceite\ (g)}{Peso\ de\ la\ muestra\ seca\ (g)}\right) * 100 \ldots\ldots\ldots \textbf{(Ec. 7)}$$

3.3.5.3. **Actividad emulsionante (AE)**

La actividad emulsionante se determinó a partir de la preparación de emulsiones de aceite en agua. Las soluciones de cada muestra a una concentración 4 % (p/v) se hidrataron por 1 h en agitación constante a 720 rpm en un Agitador Magnético RO-15 (IKA Werke, Staufen, Alemania) la fase dispersa (30 mL de aceite de soya) se agregó gota a gota a la dispersión acuosa (30 mL de solución de muestra) mediante un homogenizador Ultra Turrax T50 (IKA Works, Inc. Wilmington, EE. UU.) a una velocidad de rotación de 2000 rpm durante 2 min. Las emulsiones gruesas fueron centrifugadas a 2000 rpm en una centrífuga refrigerada 5810R (Eppendorf, AG, Hamburgo, Alemania) por 10 min (Khan et al., 2017; Neto et al., 2001). El cálculo de actividad emulsionante se determino mediante la Ecuación 8.

$$\%AE = H2(mL)/H1(mL) * 100 \ldots\ldots\ldots \textbf{(Ec. 8)}$$

Donde: $H1$= Altura inicial de la solución antes de hacer la emulsión; $H2$= Altura de la capa emulsionada.

3.3.5.4. **Estabilidad de la emulsión (EE)**

Las emulsiones preparadas descritas en la sección de AE se sometieron a 80 ± 1 °C en un baño de agua durante 45 min, posteriormente centrifugadas a 1500 rpm en una centrífuga refrigerada 5810R (Eppendorf, AG, Hamburgo, Alemania) por 5 min. La estabilidad de la emulsión (EE) se calculó de acuerdo con la Ecuación 9 (Khan et al., 2017; Neto et al., 2001).

$$\%EE = H3(mL)/H1(mL) * 100 \ldots\ldots\ldots \textbf{(Ec. 9)}$$

Donde: $H1$= Altura de la capa emulsionada antes del calentamiento; $H3$= Altura de la capa emulsionada después del calentamiento.

3.3.6. **Actividad antioxidante**

3.3.6.1. **Ensayo DPPH**

Para el ensayo DPPH• (Hashemi y Jafarpour, 2020; Maniglia y Tapia-Blácido, 2016), se mezclaron 200 mg de pulverizado de *Hericium erinaceus* y 2 mL de metanol durante 3 h en ausencia de luz a temperatura ambiente (23 ± 1 °C) (García Silveira y Tapia-Blácido, 2018). La mezcla se centrifugó a 4,042 rpm durante 10 min a 10 °C. El sobrenadante (500 µL) se mezcló con 2 mL de solución metanólica de DPPH• (0.06 42 mmol/L) y se incubó durante 30 min a temperatura ambiente en oscuridad. La absorbancia del DPPH• restante se midió en un espectrofotómetro a 517 nm (Hashemi y Jafarpour, 2020).

3.3.6.2. **Ensayo ABTS**

La actividad eliminadora de radicales ABTS en *Hericium erinaceus* se obtuvo siguiendo la metodología descrita por Nazari et al. (2023) con ligeras modificaciones. Se preparó una solución ABTS (7 mM) y se mezcló con persulfato de potasio (2.45 mM), la solución se agitó hasta que la mezcla estuvo completamente diluida en el diluyente (agua destilada). La solución se dejó reposar en oscuridad a temperatura ambiente durante 16 h para alcanzar un nivel oxidativo estable. Una vez transcurrido el tiempo, la solución se diluyó con agua destilada hasta alcanzar una absorbancia de 0.700 ± 0.020 a 734 nm. Una vez obtenida la solución de ABTS, fueron agregados 600 µL a 150 µL de extractos del pulverizado en viales con capacidad de 5 mL. Se registró la absorbancia usando un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, Estados Unidos) a 734 nm después de 7 min de reacción. Se preparó una curva de calibración de Trolox en un rango de concentración de 0.15 – 8 % v/v.

3.3.7. **Análisis estadístico**

Los resultados se expresaron como medias ± desviación estándar. Se realizaron análisis de varianza unidireccional (ANOVA) para comparar las formulaciones de yogur y los días de almacenamiento por separado. Cuando se identificaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias

de Tukey, con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. Los análisis se realizaron utilizando el software Minitab (versión 22.4.0, State College, Pensilvania, EE. UU.).

3.4. **Resultados y discusión**

3.4.1. **Caracterización fisicoquímica de *Hericium erinaceus***

3.4.1.1. **Análisis químico proximal**

El hongo *Hericium erinaceus* presenta un cuerpo fructífero de forma globosa a semiesférica, de tonalidad blanca o crema durante las etapas tempranas de desarrollo, que tiende a volverse amarillenta o marrón conforme madura. Una de sus características morfológicas más sobresalientes es la presencia de numerosas espinas colgantes, con longitudes que oscilan entre 1 y 5 cm, las cuales recubren completamente el basidiocarpo. A diferencia de otros hongos comestibles de consumo habitual, que poseen una diferenciación evidente en sombrero y estípite, *Hericium erinaceus* no presenta estas estructuras definidas, sino que crece en forma compacta cubierta de espinas (Almjalawi et al., 2024).

Entre las proteínas bioactivas identificadas en esta especie se encuentran las lectinas, que son proteínas de unión a carbohidratos con actividades inmunomoduladoras y antimicrobianas (Drzewiecka et al., 2024); asimismo, se han reportado glucanasas y quitinasas, enzimas capaces de degradar polisacáridos fúngicos y estimular la respuesta inmune (García-Carnero et al, 2020). De igual manera, diversas enzimas oxidativas implicadas en la degradación y desintoxicación de la lignina, como lacasas y peroxidasas, han mostrado actividad antioxidante y antibacteriana (Mwangi et al., 2022).

El análisis químico proximal de los alimentos consiste en la determinación de parámetros como humedad, grasa, fibra, cenizas, carbohidratos solubles y proteína, lo que permite caracterizar su valor nutricional y evaluar su posible aplicación en la industria alimentaria o en investigación para el desarrollo e

innovación de nuevos productos. El contenido químico proximal de *Hericium erinaceus* se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Contenido químico proximal de *Hericium erinaceus*.

Parámetro (%)	HE
Humedad	9.79 ± 0.03
Cenizas	5.48 ± 0.05
Proteína cruda	14.84 ± 0.07
Extracto etéreo	3.05 ± 0.32
Fibra cruda	17.15 ± 0.01
*Carbohidratos	49.69 ± 0.46

*Los carbohidratos fueron calculados por la diferencia de la suma de los componentes -100. Los valores correspondientes a media ± desviación estándar. *Hericium erinaceus* (HE).

Los valores obtenidos en el análisis químico proximal de *Hericium erinaceus* fueron comparables con los reportados en la literatura para esta especie, aunque con algunas variaciones las cuales son atribuibles a factores como el sustrato de cultivo, las condiciones de secado y el estado de desarrollo del cuerpo fructífero (Friedman, 2015). En el presente estudio, el contenido de proteína cruda (14.84 ± 0.07%) se encuentra en un intervalo cercano a lo previamente reportado por Sun et al. (2025) (15.20 %) lo que confirma que *Hericium erinaceus* constituye una fuente relevante de proteína de origen fúngico. El contenido de fibra cruda (17.15 ± 0.01 %) fue similar a los valores reportados en estudios de composición química de polvo deshidratado de *Hericium erinaceus* por Zhang et al. (2024) donde reportó un 16.99 %. En relación con los carbohidratos, que constituyeron la fracción mayoritaria en la muestra (49.69 ± 0.46 %) fue similar a lo obtenido por Atila et al. (2024) reportando un 45.01 % en muestras en base seca. Diversos estudios señalan que los polisacáridos representan el principal componente de la materia seca de este hongo, destacando los β-glucanos como compuestos predominantes y responsables de gran parte de sus propiedades funcionales (Yu et al., 2025).

Por otra parte, el contenido de cenizas (5.48 ± 0.05 %) y extracto etéreo (3.05 ± 0.44 %) coincide con lo descrito para *Hericium erinaceus*, caracterizado

por presentar niveles moderados de minerales y bajo contenido de lípidos, lo que es típico en hongos comestibles y que contribuye a su valor nutricional y dietético (Friedman, 2015). En particular, Atila et al. (2024) y Valverde et al. (2015) han reportado contenidos de cenizas de 4.03 y 7.18 % respectivamente, mientras que el extracto etéreo generalmente se encuentra por debajo de 5 %, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación. El contenido químico proximal de la harina de *Hericium erinaceus* permite considerar su uso como aditivo o ingrediente en la industria alimentaria, debido a la cantidad de nutrientes que presenta.

3.4.1.2. **Cuantificación de ß-glucanos.**

La extracción y purificación de β-glucanos en hongos comestibles consiste en la separación de polisacáridos estructurales de otros componentes presentes en los alimentos como proteínas, lípidos y minerales. Este proceso es fundamental, ya que permite obtener fracciones más concentradas y con mayor grado de pureza, lo que facilita su cuantificación, caracterización estructural y evaluación de sus propiedades biológicas y funcionales. Asimismo, el nivel de pureza influye directamente en la actividad biológica de los β-glucanos y en su potencial aplicación en el desarrollo de alimentos funcionales y productos nutracéuticos (Ruthes et al., 2016).

En la presente investigación, la cuantificación de β-glucanos correspondió a 81.02 ± 0.72 %. Este valor se calculó mediante el procedimiento colorimétrico descrito en la metodología y su interpretación considera que el ensayo K-GLUC cuantifica D-glucosa, mientras que la determinación específica de β-glucanos en hongos requiere diferenciar los glucanos totales de los α-glucanos. Diversos reportes para *Hericium erinaceus*. Jeenpitak et al. (2026) han informado que extractos de esta especie pueden contener alrededor de 61.7 % de β-glucanos sin procesos extensivos de purificación, lo que evidencia que este polisacárido constituye una proporción importante de los carbohidratos estructurales de *Hericium erinaceus*. Por su parte, Tripodi et al. (2022) reportaron concentraciones de hasta 85.15 % tras la purificación de

los β-glucanos. En general, los valores descritos para material seco o extractos convencionales oscilan entre 40-y 68 %; sin embargo, en fracciones purificadas se han documentado concentraciones cercanas o superiores al 80 %, lo que sugiere que el método de extracción, la remoción de otros componentes y el grado de concentración influyen significativamente en la cuantificación final (Jeenpitak et al., 2026; Chen et al., 2022).

3.4.1.3. **Determinación de color**

El color la harina de *Hericium erinaceus* se determinó por el sistema triestímulo de Hunter utilizando los parámetros (CIE L*, a* y b*) indicando la siguiente información: L* define el rango de luminosidad de 0 (oscuridad) a 100 (luminosidad); en el eje a* (rojo-verde) los valores positivos muestran tonalidades rojizas y los valores negativos muestran tonos verdes, mientras que para b* (amarillo-azul) los valores positivos representan tonalidades amarillas y los valores negativos a los azules (McGuire, 1992). Los datos obtenidos en la determinación de color se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Espacio de color en muestras secas de *Hericium erinaceus.*

Muestra	Espacio de color promedio		
	L*	a*	b*
HE	84.68 ± 0.03	0.97 ± 0.14	28.64 ± 0.12

Los valores correspondientes a media ± desviación estándar. *Hericium erinaceus* (HE).

La harina de *Hericium erinaceus* presentó valores de color caracterizados por una alta luminosidad (L* = 84.68 ± 0.03), valores de a* cercanos a cero y b* positivos, lo que indica una tonalidad clara con tendencia amarillenta. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Gunathilake et al. (2025) los cuales se describen de color blanco a beige claro, con valores de luminosidad elevados (L*= 88.57) y valores positivos en b* lo que refleja la presencia de pigmentos amarillentos naturales del hongo.

Resultados similares han sido descritos en harinas de otros hongos comestibles, por ejemplo en *Pleurotus sp.* donde se han observado valores

de L* de 71.34 a 76. 02 y b* positivos, asociados a la composición del sustrato, condiciones de cultivo y procesos de secado, factores que influyen en reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático y, por tanto, en el color final del producto (Vélez-Uribe et al., 2023). Asimismo, diversos estudios indican que los polvos de hongos tienden a presentar tonalidades claras a beige y que cambios en luminosidad o cromaticidad pueden relacionarse con el tamaño de partícula, el secado y la oxidación de compuestos fenólicos o azúcares reductores (Gunathilake et al., 2025)

3.4.2. **Propiedades funcionales de *Hericium erinaceus***

3.4.2.1. **Poder de hinchamiento**

El poder de hinchamiento (PH) de la harina de *Hericium erinaceus* obtenido en este estudio fue de 5.92 ± 0.19 g g^{-1}, valor que indica una capacidad moderada de absorción de agua y expansión del material, este comportamiento se relaciona principalmente con el contenido de fibra dietética y polisacáridos estructurales, como β-glucanos y quitina, los cuales favorecen la retención de agua y la expansión de la matriz durante la hidratación. Resultados semejantes fueron reportados por Phat et al. (2014) al evaluar el efecto de la molienda sobre las propiedades fisicoquímicas de *Hericium erinaceus*, reportando una capacidad de hinchamiento de 5.90 g g^{-1}, valores comparables a los obtenidos en esta investigación.

Asimismo, Kostanda et al. (2024) evaluaron las propiedades tecnofuncionales de harinas de *Hericium* spp. y demostraron que la capacidad de hinchamiento se encuentra estrechamente relacionada con el contenido de fibra dietética y con la estructura de los polisacáridos presentes en la pared celular fúngica, reportando valores cercanos a 6.88 g g^{-1}, lo que confirma que las harinas de hongos comestibles suelen presentar una capacidad de hinchamiento moderada y comparable entre especies, además, se ha señalado que las propiedades tecnofuncionales, incluido el hinchamiento, dependen del

método de secado y la estructura del material, factores que pueden explicar las variaciones entre estudios.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la harina de *Hericium erinaceus* posee propiedades de hidratación similares a las reportadas para otros hongos comestibles de su misma especie lo cual sugiere su potencial aplicación como ingrediente funcional en alimentos, dado que el poder de hinchamiento influye significativamente en la textura, la viscosidad y la estabilidad de las matrices alimentarias.

3.4.2.2. **Capacidad de la unión de la grasa**

La capacidad de unión de grasa (CUG) permite evaluar el potencial de los ingredientes para emplearse en emulsiones con alto contenido lipídico o como agentes estabilizantes en distintos sistemas alimentarios. Este parámetro es importante en la caracterización funcional de las harinas, ya que proporciona información sobre su habilidad para retener grasa, propiedad que influye en la textura, estabilidad y aceptación de los productos en los que se incorporan (Yuan et al., 2025).

En el presente estudio, la harina de *Hericium erinaceus* mostró una CUG de 3.18 ± 0.01 %, lo que indica una capacidad moderada de interacción con compuestos lipídicos. Esta propiedad está relacionada con la composición de la pared celular de los hongos, particularmente con la presencia de polisacáridos estructurales y proteínas que favorecen la retención de aceite mediante interacciones físicas y enlaces hidrofóbicos (Kumar et al., 2011). De manera similar, Ouali et al. (2022) reportaron valores de CUG de 3.19 % en harina derivada de *Hericium americanum,* hongo que comparte una composición fisicoquímica y funcional similar a *Hericium erinaceus*, lo que coincide con los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Asimismo, estudios en hongos comestibles con características estructurales similares han mostrado valores comparables o incluso mayores. En harina de *Pleurotus ostreatus* se han reportado valores de capacidad de unión de grasa

de 2.45 % (Adejumo & Awosanya, 2005), mientras que en *Pleurotus tuber-regium* se han evidenciado valores cercanos a 4.20 % (Kumar et al., 2011). Estos resultados confirman que los hongos presentan una capacidad apreciable para la retención de lípidos debido a su estructura fibrosa y contenido proteico. En conjunto, lo anterior sugiere que la CUG obtenida para *Hericium erinaceus* se encuentra dentro del rango esperado para harinas de hongos comestibles y puede considerarse adecuada para aplicaciones en alimentos donde se requiera retención de grasa, como productos emulsificados, cárnicos o sistemas lácteos fermentados.

3.4.2.3. **Actividad emulsionante (AE)**

La AE es la capacidad de una harina para formar y estabilizar emulsiones, se considera un sistema en la que la fase oleosa se dispersa en una fase acuosa durante la preparación de alimentos, esta propiedad depende principalmente de la presencia de proteínas y algunos carbohidratos solubles, los cuales poseen regiones hidrofílicas e hidrofóbicas que les permiten orientarse en la interfase aceite-agua, reducir la tensión interfacial y formar una película protectora alrededor de las gotas de aceite, favoreciendo la estabilidad del sistema (Kurt & Gençcelep, 2018). En el caso de las harinas de hongos, la actividad emulsionante también está influenciada por el contenido de polisacáridos estructurales, como los β-glucanos, así como por factores como la solubilidad proteica y el pH del medio (Cruz-Solorio et al., 2018)

La AE obtenida en esta investigación (84.13 ± 0.11 %) se considera consistente con lo reportado en la literatura para harinas de hongos comestibles, dato comparable con Cruz-Solorio et al. (2018) quienes reportaron una AE de 94.4 % en harina de *Pleurotus ostreatus*, lo que demuestra la capacidad de estos materiales para actuar como agentes emulsificantes en sistemas alimentarios. De manera similar, estudios en matrices alimentarias enriquecidas con hongos comestibles han demostrado que la incorporación de biomasa fúngica puede modificar las propiedades reológicas y viscoelásticas, así como la estructura del sistema, lo cual está

directamente relacionado con la capacidad para estabilizar emulsiones y mejorar la textura del producto final (Balan et al., 2020). En este contexto, el valor obtenido en el presente trabajo se encuentra dentro del rango esperado para ingredientes fúngicos con potencial tecnológico y funcional. En el caso específico de *Hericium erinaceus*, los resultados observados en la AE se atribuyen a su composición proximal y estructural, debido a que se caracteriza por un contenido proteico de aproximadamente 15 a 25 % en base seca y una fracción significativa de polisacáridos, principalmente β-glucanos, además de quitina y otros polisacáridos complejos presentes en la pared celular (Cui et al., 2023).

3.4.2.4. **Estabilidad de la emulsión (EE)**

La EE, a diferencia de la AE, que describe la capacidad inicial de formar una emulsión, indica la capacidad de mantenerla estable durante el almacenamiento o el reposo. Principalmente se produce gracias a las proteínas y polisacáridos, lo cual está relacionado con la formación de una película interfacial que protege las gotas de aceite frente a fenómenos como la coalescencia o el cremado. Este parámetro es importante para evaluar el potencial de los ingredientes en alimentos emulsionados como el yogur, aderezos, salsas y algunos otros productos, ya que influye en la textura, apariencia y vida útil de estos (Wilde & Chu., 2021).

La harina de *Hericium erinaceus* presentó una estabilidad de emulsión de 56.55 ± 0.15 %, lo que indica una capacidad moderada para mantener la dispersión de la fase oleosa. El porcentaje determinado se encuentra en concordancia con el reportado por Cruz-Solorio et al. (2018) para harina de *Pleurotus ostreatus* (49.99 %). En general, valores congruentes al 50 % se consideran tecnológicamente aceptables en harinas vegetales y fúngicas, ya que indican una capacidad funcional adecuada para aplicaciones en sistemas alimentarios emulsionados. Por lo tanto, el porcentaje obtenido sugiere que la harina de *Hericium erinaceus* posee potencial como ingrediente funcional en productos donde se requiere estabilidad física de la emulsión. Las

proteínas presentes en *Hericium erinaceus*, particularmente las fracciones solubles tipo albúminas y globulinas, así como los péptidos derivados de su hidrólisis, poseen dominios anfifílicos que les permiten orientarse y adsorberse en la interfase aceite-agua, donde forman una película interfacial capaz de disminuir la tensión superficial y actuar como barrera física frente a la coalescencia de las gotas lipídicas; asimismo, los β-glucanos junto con otros polisacáridos complejos incrementan la viscosidad de la fase continua y favorecen la formación de una red estructural tridimensional que restringe el movimiento y la agregación de las gotas dispersas. (Sun et al., 2025).

3.4.3. **Actividad antioxidante de *Hericium erinaceus***

La evaluación de la actividad antioxidante es un parámetro relevante para determinar la calidad y el potencial funcional de alimentos y nutracéuticos. Para ello, se han desarrollado diversos métodos basados en la reducción de moléculas inestables, como los radicales DPPH y ABTS, que se estabilizan cuando una sustancia antioxidante es capaz de donar electrones o átomos de hidrógeno (Apak & Shahidi, 2017).

En la presente investigación, la actividad antioxidante fue de 81.09 ± 1.24 y 85.14 ± 0.92 % para la inhibición de los radicales ABTS y DPPH, respectivamente, lo que evidencía una elevada capacidad de neutralización de radicales libres. Estos valores son similares a los reportados por Qiao et al. (2024), quienes observaron porcentajes de inhibición de 80.11 %, consistentes con lo descrito para extractos de *Hericium erinaceus*, cuya actividad antioxidante se atribuye principalmente a la presencia de compuestos fenólicos, polisacáridos y otros metabolitos bioactivos. De manera consistente, Ghosh et al. (2021) informaron un 81 % de inhibición del radical ABTS, lo que respalda la elevada capacidad antioxidante atribuida a esta especie fúngica. La diferencia observada entre los porcentajes de inhibición obtenidos en ABTS y DPPH puede deberse a la naturaleza química de cada radical y a su mecanismo de reacción. El radical DPPH reacciona preferentemente con compuestos capaces de donar hidrógeno en medios

orgánicos, mientras que el radical ABTS puede reaccionar tanto con antioxidantes hidrofílicos como lipofílicos, lo que puede generar variaciones en la magnitud de la inhibición (Apak & Shahidi, 2017). Por lo tanto, los porcentajes de inhibición evidencían diferencias en la capacidad de los compuestos presentes en el extracto para interactuar con el radical evaluado, lo que sugiere variaciones en su afinidad y en su mecanismo de acción.

Asimismo, diversos estudios han señalado que la actividad antioxidante en este hongo puede variar ampliamente en función del método de secado, extracción, etapa de maduración del hongo y la composición química del extracto, observándose porcentajes de inhibición que oscilan aproximadamente entre 50 % y 70 % en el ensayo ABTS y por encima del 80 % en la prueba DPPH (Tachabenjarong et al., 2022; Sevindik, 2024).

3.5. **Conclusiones**

Los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica, funcional y antioxidante de *Hericium erinaceus* evidencian que esta especie presenta un perfil nutricional relevante, caracterizado por contenido de proteína (14.84 ± 0.07 %), fibra (17.15 ± 0.01 %) y carbohidratos (49.69 ± 0.46 %), así como niveles moderados de lípidos y cenizas, lo que respalda su valor como materia prima de interés alimentario. De igual manera, la elevada concentración de β-glucanos (81.02 ± 0.72 %) confirma su importancia como fuente de polisacáridos bioactivos, asociados con múltiples beneficios tecnológicos y biológicos. En cuanto a sus propiedades funcionales, la harina de *Hericium erinaceus* mostró capacidades favorables para la adición en una matriz láctea de PH, CUG, AE y EE, lo cual sugiere su potencial aplicación como ingrediente estructurante en matrices alimentarias como productos lácteos fermentados. Finalmente, la alta actividad antioxidante en ambos ensayos ($DPPH^{\bullet+}$ y $ABTS^{\bullet+}$). indica la presencia de compuestos bioactivos con capacidad de neutralización de radicales libres, reforzando su valor como ingrediente funcional. Estos resultados demuestran que *Hericium erinaceus*

constituye una alternativa para su incorporación en el desarrollo de alimentos funcionales con propiedades nutracéuticas y tecnológicas mejoradas.

3.6. **Agradecimientos**

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico otorgado durante los dos años de estudio, al Departamento de Preparatoria Agrícola y al Departamento de Ingeniería Agroindustrial por facilitar los materiales requeridos en esta investigación.

3.7. **Literatura citada**

Adejumo, T. O., & Awosanya, O. B. (2005). Proximate and mineral composition of four edible mushroom species from south-western Nigeria. *African Journal of Biotechnology, 4*(10), 1084-1088.

Almjalawi B.S.A., Chechan R.A., Alhesnawi A.S.M. Some applications of Hericium erinaceus mushrooms: A review. South Asian Res. J. Agric. Fish. 2024;6:92–100. doi: 10.36346/sarjaf.2024.v06i05.002.

AOAC International. (1996). Official Methods of Analysis of AOAC International (P. Cunniff, Ed.; 16.ª ed.). Association of Official Analytical Chemists.

Apak, R., Capanoglu, E., & Shahidi, F. (2017). Measurement of antioxidant activity and capacity: Recent trends and applications. Recuperado de https://books.google.es/

Atila, F., Owaid, M. N., & otros autores. (2024). Effects of substrate formulation on yield, enzyme activities and nutritional composition of *Hericium erinaceus*. *Frontiers in Plant Science*. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1436385

Bae, I. Y., Kim, K. J., Shin, M. S., Lee, H. G., & Lee, S. (2009). Mechanochemical modification of oat bran and its effect on physicochemical properties. Food Chemistry, 113(4), 1140-1145.

Balan, V., Mihai, C. T., Cojocaru, F. D., Uritu, C. M., Dodi, G., Botezat, D., & Gardikiotis, I. (2020). Bioactive compounds and antioxidant activity of mushroom powders in food systems. *Food Chemistr**y***, 330, 127271. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127271

Castro-Alves, V. C. y Do Nascimento, J. R. O. (2016). Polysaccharides from raw and cooked chayote modulate macrophage function. Food Res. Int. 81, 171–179. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.017

Chen, S. N., Chang, C. S., Yang, M. F., Chen, S., Soni, M., & Mahadevan, B. (2022). Subchronic toxicity and genotoxicity studies of *Hericium erinaceus* β-glucan extract preparation. *Current Research in Toxicology, 3*, 100068. https://doi.org/10.1016/j.crtox.2022.100068

Chirapongsatonkul, N., Mueangkan, N., Wattitum, S., & U-Taynapun, K. (2019). Comparative evaluation of the immune responses and disease resistance of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) induced by yeast β-glucan and crude glucan derived from mycelium in the spent mushroom substrate of Schizophyllum commune. Aquaculture Reports, 15, 100205. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100205

Cruz-Solorio, A., Villanueva-Arce, R., Garín-Aguilar, M. E., Leal-Lara, H., & Toro, G. V. (2018). Functional properties of flours and protein concentrates of 3 strains of the edible mushroom *Pleurotus ostreatus. Journal Of Food Science And Technology*, 55(10), 3892-3901. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3312-x

Cui, W., Song, X., Li, X., Jia, L., & Zhang, C. (2023). Structural characterization of Hericium erinaceus polysaccharides and the mechanism of anti-T2DM by modulating the gut microbiota and metabolites. International Journal Of Biological Macromolecules, 242(Pt 4), 125165. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125165

Drzewiecka B., Wessely-Szponder J., Świeca M., Espinal P., Fusté E., Fernández-De La Cruz E. (2024). Bioactive peptides and other immunomodulators of mushroom origin. Biomedicines. 2024;12:1483. doi: 10.3390/biomedicines12071483.

Freimund, S., Janett, S., Arrigoni, E., & Amad, R. (2004). Optimised quantification method for yeast-derived 1,3-?-d-glucan and ?-d-mannan. European Food Research And Technology, 220(1), 101-105. https://doi.org/10.1007/s00217-004-1008-0

Friedman, M. (2015). Chemistry, nutrition, and health-promoting properties of *Hericium erinaceus* (Lion's mane) mushroom fruiting bodies and mycelia and their bioactive compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63*(32), 7108–7123. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02914

García-Carnero L.C., Martínez-Álvarez J.A., Salazar-García L.M., Lozoya-Pérez N.E., González-Hernández S.E., Tamez-Castrellón A.K. (2020). Recognition of fungal components by the host immune system. Curr. Protein Pept. Sci. 2020;21:245–264. doi: 10.2174/1389203721666191231105546.

Ghosh, S., Nandi, S., Banerjee, A., Sarkar, S., Chakraborty, N., & Acharya, K. (2021). Prospecting medicinal properties of Lion's mane mushroom. Journal Of Food Biochemistry, 45(8), e13833. https://doi.org/10.1111/jfbc.13833

Gunathilake, S., Aluthge, S., Farahnaky, A., Huynh, T., Ssepuuya, G., & Majzoobi, M. (2025). Functional and Nutritional Properties of Lion's Mane Mushrooms in Oat-Based Desserts for Dysphagia and Healthy Ageing. Foods, 14(23), 4153. https://doi.org/10.3390/foods14234153

Hashemi, S. M. B., & Jafarpour, D. (2020). Bioactive compounds and antioxidant activities of various extracts from different parts of various fruits. Journal of Food Measurement and Characterization.

Jabłońska-Ryś, E. (2025). Fortifying Yogurt with Edible Mushrooms: Bioactive Compounds and Product Properties. Applied Sciences, 15(24), 12949. https://doi.org/10.3390/app152412949

Jeenpitak, T., Pattarapisitporn, A., Tangjaidee, P., Khumsap, T., Yawootti, A., Phongthai, S., Noma, S., & Klangpetch, W. (2026). Valorization of *Hericium erinaceus* By-Products for β-Glucan Recovery via Pulsed Electric Field-Assisted Alkaline Extraction and Prebiotic Potential Analysis. Foods, 15(1), 145. https://doi.org/10.3390/foods15010145

Khan, M. A., Ullah, N., Sun, J., Wang, L., Murtaza, M. A., Ahmed, Z., & Zhang, J. (2017). Antioxidant and emulsifying properties of soy protein isolate-maltodextrin conjugates. International Journal of Biological Macromolecules.

Korley K. N., Odamtten, G. T., Obodai, M., Appiah,V. and ToahAkonor, P. 2015. Determination of color parameters of gamma irradiated fresh and dried mushrooms during storage. Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology, 10(1-2): 66-71.

Kostanda, E., Musa, S., & Pereman, I. (2024). Unveiling the Chemical Composition and Biofunctionality of Hericium spp. Fungi: A Comprehensive Overview. International Journal Of Molecular Sciences, 25(11), 5949. https://doi.org/10.3390/ijms25115949

Kostanda, E., Musa, S., & Pereman, I. (2024). Unveiling the Chemical Composition and Biofunctionality of Hericium spp. Fungi: A Comprehensive Overview. *International Journal Of Molecular Sciences*, 25(11), 5949. https://doi.org/10.3390/ijms25115949

Kour, H., Kour, D., Kour, S., Singh, S., Hashmi, S. A. J., Yadav, A. N., Kumar, K., Sharma, Y. P., & Ahluwalia, A. S. (2022). Bioactive compounds from mushrooms: Emerging bioresources of food and nutraceuticals. Food Bioscience, 50, 102124. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102124

Kumar, K., Yadav, A. N., & Singh, A. (2011). Evaluation of functional properties of edible mushroom flours. *Journal of Food Science and Technology, 48*(6), 709-715. https://doi.org/10.1007/s13197-010-0180-6

Kurt, A., & Gençcelep, H. (2018). Enrichment of meat emulsion with mushroom (*Agaricus bisporus*) powder: Impact on rheological and structural characteristics. Journal Of Food Engineering, 237, 128-136. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.028

Li, I., Lee, L., Tzeng, T., Chen, W., Chen, Y., Shiao, Y., & Chen, C. (2018). Neurohealth Properties ofHericium erinaceusMycelia Enriched with Erinacines. *Behavioural Neurology*, *2018*, 1-10. https://doi.org/10.1155/2018/5802634

Lin, M. J. Y., Humbert, E. S., & Sosulski, F. W. (1974). CERTAIN FUNCTIONAL PROPERTIES OF SUNFLOWER MEAL PRODUCTS. Journal Of Food Science, 39(2), 368-370. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1974.tb02896.x

Maniglia, B. C., & Tapia, M. S. (2016). Antioxidant capacity and phenolic content of different food matrices. Food Research International.

Mwangi R.W., Macharia J.M., Wagara I.N., Bence R.L. The antioxidant potential of different edible and medicinal mushrooms. Biomed. Pharmacother. 2022;147:112621. doi: 10.1016/j.biopha.2022.112621.

Neto, V. Q., Narain, N., Silva, J. B., & Bora, P. S. (2001). Functional properties of raw and roasted cashew nut (Anacardium occidentale L.) kernel flours. Journal of the Science of Food and Agriculture, 81(11), 1053-1060.

Nollet, L. M. L. (Ed.). (1996). Handbook of Food Analysis: Volume 1: Physical Characterization and Nutrient Analysis. Marcel Dekker, Inc.

Ouali, Z., Chaar, H., Venturella, G., Cirlincione, F., Gargano, M. L., & Jaouani, A. (2022). Chemical composition and nutritional value of nine wild edible mushrooms from Northwestern Tunisia. Nova Science Publishers (Nova Science Publishers, Inc.). https://doi.org/10.6092/issn.2531-7342/15649

Peterson, G. L. (1977). A simplification of the protein assay method of Lowry et al. which is more generally applicable. Analytical Biochemistry, 83(2), 346–356. https://doi.org/10.1016/0003-2697(77)90043-4

Phat, C., Li, H., Lee, D., Moon, B., Yoo, Y., & Lee, C. (2014). Characterization of *Hericium erinaceum* powders prepared by conventional roll milling and jet milling. Journal Of Food Engineering, 145, 19-24. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.08.001

Qiao, Z., Jia, X., Wang, Y., Wang, Y., Zhou, Y., Li, F., Qu, Y., & Cheng, H. (2024). Structural analysis and antioxidant activity of alkaline-extracted glucans from *Hericium erinaceus.* Foods, 13(17), 2742. https://doi.org/10.3390/foods13172742

Ruthes, A. C., Smiderle, F. R., & Iacomini, M. (2016). Mushroom heteropolysaccharides: A review on their sources, structure and biological effects. *Carbohydrate Polymers, 136*, 358–375. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.061

Sevindik, M., Gürgen, A., Khassanov, V. T., & Bal, C. (2024). Biological activities of ethanol extracts of Hericium erinaceus obtained as a result of optimization analysis. Foods, 13(10), 1560. https://doi.org/10.3390/foods13101560

Ślusarczyk, J., Adamska, E., & Czerwik-Marcinkowska, J. (2021). Fungi and Algae as Sources of Medicinal and Other Biologically Active Compounds: A Review. *Nutrients*, *13*(9), 3178. https://doi.org/10.3390/nu13093178

Sun, N., Li, C., Liang, W., Wu, Z., Han, X., & Xu, S. (2025). Extraction, structural characterization and biological activities of polysaccharides derived from *Hericium erinaceus*. *Food Science & Nutrition, 13*(12), e71275. https://doi.org/10.1002/fsn3.71275

Tachabenjarong, N., Rungsardthong, V., Ruktanonchi, U., Poodchakarn, S., Thumthanaruk, B., Vatanyoopaisarn, S., Suttisintong, K., Iempridee, T., & Uttapap, D. (2022). Bioactive compounds and antioxidant activity of Lion's Mane mushroom (*Hericium erinaceus*) from different growth periods. E3S Web of Conferences, 355, 02016. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235502016

Thongbai, B., Rapior, S., Hyde, K. D., Wittstein, K., & Stadler, M. (2015). Hericium erinaceus, an amazing medicinal mushroom. Mycological Progress, 14(10). https://doi.org/10.1007/s11557-015-1105-4

Tripodi, F., Falletta, E., Leri, M., Angeloni, C., Beghelli, D., Giusti, L., Milanesi, R., Sampaio-Marques, B., Ludovico, P., Goppa, L., Rossi, P., Savino, E., Bucciantini, M., & Coccetti, P. (2022). Anti-Aging and Neuroprotective Properties of *Grifola frondosa* and *Hericium erinaceus* Extracts. Nutrients, 14(20), 4368. https://doi.org/10.3390/nu14204368

Valverde, M. E., Hernández-Pérez, T., & Paredes-López, O. (2015). Edible mushrooms: Improving human health and promoting quality life. *International Journal of Microbiology*, 2015, 376387. https://doi.org/10.1155/2015/376387

Vélez-Uribe, T., Orozco-Agudelo, N., Manjarrés-Pinzón, G., Manjarrés-Pinzón, K., Gil González, J., & Rodríguez-Sandoval, E. (2023). Physicochemical, antioxidant, and technofunctional properties of mushroom (*Pleurotus sp*) flour obtained by hot air drying. DYNA, 90(225), 85-94. https://doi.org/10.15446/dyna.v90n225.106026

Wilde, P. J., & Chu, B. S. (2021). Interfacial and emulsifying properties of food proteins. Current Opinion in Food Science, 39, 145–152.

Xue, Z., Li, J., & Wang, Y. (2019). Neuroprotective effects of polysaccharides from Hericium erinaceus against oxidative stress-induced apoptosis in neurons. International Journal of Biological Macromolecules, 133, 1197-1206. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.185

Yu, P., Ma, J., Yang, L., Dong, Q., Yu, C., Xu, B., & Zhao, Y. (2025). Advances in the extraction, purification, structural characterization, and biological functions of polysaccharides from *Hericium erinaceus*. *Frontiers in Nutrition, 12*, 1634699. https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1634699

Yuan, Y., Wang, X., Ling, N., Zhou, J., Zhao, L., Zhao, L., Ji, B., Zhou, F., Zhao, L., & Zhao, L. (2025). Hydrolysates from Sesame Meal and In Vivo Study of Their Gastric Mucosal Protective Effects. Foods 2024, 13, 4178. Foods, 14(7), 1281. https://doi.org/10.3390/foods14071281

Zhang., Jia, X., Wang, Y., Wang, Y., Zhou, Y., Li, F., Qu, Y., & Cheng, H. (2024). Structural Analysis and Antioxidant Activity of Alkaline-Extracted Glucans from Hericium erinaceus. *Foods*, *13*(17), 2742. https://doi.org/10.3390/foods13172742

Zhu, H., Chen, Z., Li, G., Yao, X., Hu, Y., & Zhao, W. (2023). *Physicochemical, sensory, and antioxidant characteristics of stirred-type yogurt enriched with* Lentinula edodes *stipe powder*. Food Science & Nutrition, 11(10), 6231–6240. https://doi.org/10.1002/fsn3.3563

Żulewska, J., Baranowska, M., Bielecka, M. M., Dąbrowska, A. Z., Tarapata, J., Kiełczewska, K., & Łobacz, A. (2025). Effect of Fortification with High-Milk-Protein Preparations on Yogurt Quality. Foods, 14(1), 80. https://doi.org/10.3390/foods14010080

Maity, P., Nandi, A. K., Manna, D. K., Pattanayak, M., Sen, I. K., Bhanja, S. K & Islam, S. S. (2017). Structural characterization and antioxidant activity of a glucan from Meripilus giganteus. Carbohydrate Polymers, 157, 1237-1245. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.11.006

Morales, D., Smiderle, F. R., Piris, A. J., Soler-Rivas, C., & Prodanov, M. (2019). Production of a β-D-glucan-rich extract from Shiitake mushrooms (Lentinula edodes) by an extraction/microfiltration/reverse osmosis (nanofiltration) process. Innovative food science & emerging technologies, 51, 80-90. doi:10.1016/j.ifset.2018.04.003

4. EFECTO DE LA ADICIÓN DE *Hericium erinaceus* SOBRE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES Y MICROESTRUCTURALES EN YOGUR BATIDO

4.1. Resumen[1]

El objetivo de esta investigación fue determinar las propiedades sensoriales, fisicoquímicas, mecánicas y microestructurales de *Hericium erinaceus* adicionado a yogures batidos con 2.2 % de grasa (YCG_0) y reducidos en grasa (1.1 %) con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p ($YBG_{0.05}$, $YBG_{0.1}$ y $YBG_{0.15}$) de harina de *Hericium erinaceus*. Los parámetros evaluados variaron significativamente ($p < 0.05$) durante el periodo de almacenamiento de 15 días. La adición de *Hericium erinaceus* mostró incremento de proteína (21.99 ± 0.43) y cenizas (3.90 ± 0.15) conforme iba aumentando la adición del hongo, mientras que la humedad aumentó y los carbohidratos disminuyeron por efecto de dilución y enriquecimiento de sólidos. Durante el almacenamiento, el pH disminuyó y la acidez titulable aumentó en todos los tratamientos, siendo más pronunciado en las mayores concentraciones, lo que indica mayor actividad de bacterias ácido-lácticas. Además, los ensayos de digestión simulada mostraron mayor estabilidad antioxidante en tratamientos enriquecidos. La adición de *Hericium erinaceus* en los yogures bajos en grasa produjo valores intermedios de viscosidad inicial, observándose un incremento progresivo conforme aumentó la concentración del hongo, particularmente en $YBG_{0.15}$ (693.15 ± 8.32 Pa·s), mientras que $YBG_{0.05}$ y $YBG_{0.1}$ no mostraron diferencias significativas entre sí, los resultados nos indican que a bajas concentraciones de *Hericium erinaceus* el efecto estructural aún es limitado. En las microestructuras de $YBG_{0.15}$ se pudo visualizar una red integrada, con agregados proteicos fusionados y con una mínima porosidad en la cual la superficie presentó ondulaciones suaves, pero sin discontinuidades marcadas, lo que indica cohesión estructural. Finalmente, el análisis sensorial indicó aceptabilidad moderada en las formulaciones con adición, sin afectar significativamente parámetros como el color y sabor.

Palabras clave: Yogur bajo en grasa, sinéresis, caseínas, evaluación sensorial.

Tesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Ana Bethsi Hernández Rivera
Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

[1] Este capítulo corresponde al artículo científico enviado a la Revista Mexicana de Ingeniería Química.

EFFECT OF THE ADDITION OF *Hericium erinaceus* ON THE FUNCTIONAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES IN STIRRED YOGURT

Abstract

The objective of this research was to determine the sensory, physicochemical, mechanical, and microstructural properties of *Hericium erinaceus* added to stirred yogurts with 2.2 % fat (YCG_0) and reduced-fat yogurts (1.1 %) with 0.05, 0.1, and 0.15 % w/w ($YBG_{0.05}$, $YBG_{0.1}$, and $YBG_{0.15}$) of *Hericium erinaceus* flour. The evaluated parameters varied significantly ($p < 0.05$) during the 15-day storage period. The addition of *Hericium erinaceus* showed an increase in protein (21.99 ± 0.43) and ash (3.90 ± 0.15) as mushroom addition increased, while moisture increased and carbohydrates decreased due to dilution effect and solids enrichment. During storage, pH decreased and titratable acidity increased in all treatments, being more pronounced at higher concentrations, indicating greater activity of lactic acid bacteria. Furthermore, simulated digestion assays showed greater antioxidant stability in enriched treatments. The addition of *Hericium erinaceus* in reduced-fat yogurts produced intermediate initial viscosity values, showing a progressive increase as mushroom concentration increased, particularly in $YBG_{0.15}$ (693.15 ± 8.32 Pa·s), while $YBG_{0.05}$ and $YBG_{0.1}$ did not show significant differences between them; these results indicate that at low concentrations of *Hericium erinaceus* the structural effect is still limited. In the microstructures of $YBG_{0.15}$, an integrated network could be visualized, with fused protein aggregates and minimal porosity in which the surface presented smooth undulations but without marked discontinuities, indicating structural cohesion. Finally, sensory analysis indicated moderate acceptability in the supplemented formulations, without significantly affecting parameters such as color and flavor.

Keywords: Low-fat yogurt, syneresis, caseins, sensory evaluation.

Thesis de Maestría en Ciencia, Programa de Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Ana Bethsi Hernández Rivera
Directora de Tesis: Dra. Landy Hernández Rodríguez

4.2. **Introducción**

El yogur es un producto lácteo fermentado que se obtiene a partir de la leche fresca o reconstituida mediante la acción de cultivos iniciadores específicos como *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* (Ferreira y Santos, 2023). En las últimas décadas, su consumo ha incrementado a nivel mundial, lo cual se atribuye principalmente a los efectos positivos que se le han relacionado sobre la salud del consumidor (Ahmad et al., 2022). Debido a este creciente interés, el yogur ha sido ampliamente estudiado para la incorporación de compuestos bioactivos, ya que su matriz alimentaria permite la adición de bacterias probióticas, prebióticos, fibra dietética y diversos ingredientes funcionales, sin afectar significativamente su estructura básica (Basiri et al., 2022; Wang et al., 2024).

En años recientes, el interés por el cultivo y aprovechamiento de *Hericium erinaceus* ha incrementado de manera significativa debido a la creciente demanda de hongos medicinales y alimentos funcionales en la industria alimentaria y nutracéutica. *Hericium erinaceus* se produce principalmente en sistemas de cultivo controlado que requieren condiciones específicas de temperatura, humedad y ventilación, explicadas (explicadas en la sección 2.1.) lo cual ha impulsado su desarrollo en unidades de producción especializadas. (Thongbai et al., 2015). Desde el punto de vista composicional, *Hericium erinaceus* destaca por su contenido de polisacáridos (principalmente β-glucanos), proteínas, fibra dietética, compuestos fenólicos y metabolitos secundarios los cuales han sido ampliamente asociados con actividades biológicas relevantes, incluyendo efectos antitumurales, propuedades digestivas, conexión microbiota-cerebro, entre algunas otras (Friedman, 2015). Adicionalmente, se ha reportado que estos compuestos contribuyen a propiedades tecnofuncionales importantes, tales como el PH, CUG, AE, EE y modificaciones reológicas en matrices alimentarias, lo que favorece su aplicación en el desarrollo de productos como alimentos fermentados.

Debido a su perfil nutricional y funcional, *Hericium erinaceus* puede ser considerado un ingrediente estratégico para su incorporación en matrices alimentarias como el yogur, con el objetivo de mejorar su valor nutrimental, funcionalidad y potencial bioactivo. En este contexto, la incorporación de harina de *Hericium erinaceus* adiconada en matrices lácteas fermentadas representa una alternativa innovadora para diversificar productos funcionales en el mercado. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación al adicionar *Hericium erinaceus* a un yogur batido fue evaluar su efecto en las propiedades sensoriales, fisicoquímicas, mecánicas y microestructurales del producto. Dado que el yogur es un alimento funcional y forma parte importante de la dieta humana, se busca innovar este producto para aprovechar los nutrientes del hongo, el cual aún no se ha incorporado al mercado en esta forma, representando así una alternativa novedosa de consumo.

4.3. **Materiales y métodos**

4.3.1. **Elaboración de yogur batido adicionado con *Hericium erinaceus*.**

El yogur batido fue elaborado utilizando la metodología propuesta por Hernández-Rodríguez (2017). Se prepararon dos formulaciones como controles y tres tratamientos de yogur de acuerdo con las formulaciones presentadas en el Cuadro 4. Los yogures control se prepararon con dos concentraciones de grasa diferente, yogur completo en grasa (2.2 % p/p de grasa de leche) y yogur reducido en grasa (1.1 % p/p de grasa de leche) codificados como YCG_0 y YBG_0. Los tres tratamientos consistieron en yogur reducido en grasa adicionado con harina de *Hericim erinaceus* en concentraciones de 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p, respectivamente. Los yogures elaborados con las concentraciones mencionadas anteriormente fueron codificados de la siguiente manera: $YBG_{0.05}$, $YBG_{0.1}$, $YBG_{0.15}$. Las cinco formulaciones se elaboraron en seis ocasiones diferentes, conforme avanzó el desarrollo experimental y de acuerdo con los requerimientos de muestra para los análisis, manteniendo las mismas condiciones de formulación y fermentación.

Para la elaboración del yogur se necesitó leche entera en polvo (LEP) (Alpura®, Ganaderos de Leche Pura, S.A.P.I. de C.V; Cuautitlán Izcalli, Edo.México), y leche descremada en polvo (LDP) (GV Milk LDP, Gunvoreta, S.A de C.V. México), cultivo láctico liofilizado de inoculación directa (CHOOZIT MY800-5DCU, Danisco France S.A.S., Francia) constituido por *Streptococcus thermophilus, Lactobacillus bulgaricus y Lactobacillus lactis.* Se preparó la leche rehidratada de acuerdo con el balance de sólidos presentado para los controles y las diferentes concentraciones del yogur, la cual se ajustó a 90 g de sólidos no grasos L^{-1} con LEP y LDP. Las dispersiones de leche rehidratada se colocaron en refrigeración a 4 °C por 24 h, para permitir la completa hidratación de la leche en polvo.

Cuadro 4. Formulación para las variaciones de yogur.

Tratamiento	SNG	ST	Leche en polvo		Harina (g)	Agua
			Entera (g)	Descremada (g)		
YCG_0	9.8	12	7.42	4.58	-	88
YBG_0	9.8	12	2.77	9.23	-	88
$YBG_{0.05}$	9.8	12	3.23	8.72	0.05	88
$YBG_{0.1}$	9.8	12	3.29	8.61	0.1	88
$YBG_{0.15}$	9.8	12	3.3	8.55	0.15	88

SNG: Sólidos no grasos, ST: Sólidos totales.

Cada uno de los lotes se pasteurizó a 85 ± 1 °C durante 15 minutos. Las leches se enfriaron hasta 45 ± 1 °C. Posteriormente, se inocularon con 0.003 g cultivo lácteo L^{-1}, e incubaron a 40 °C hasta una acidez de 85 °D. El yogur se enfrió y almacenó a 4 °C durante 24 horas, después se agregó la harina de *Hericium erinaceus* en las concentraciones propuestas y 60 g de azucár L^{-1} posteriormente se batió hasta homogenizar.

4.3.2. **Caracterización del yogur adicionado con *Hericium erinaceus***

4.3.2.1. **Análisis químico proximal**

La composición química proximal se realizó después de tres días de almacenamiento. Las muestras se semideshidrataron a 35 °C durante 20 h para facilitar su manipulación y preparación para los análisis . El contenido de humedad se determinó usando la Ecuación 10 por el método Nollet, 1996; AOAC 1996 , la proteína se determinó con la Ecuación 11 por el método Kjeldahl (N x 6.25) AOAC 954.01, el extracto etéreo por medio de la Ecuación 12 mediante Soxhlet (AOAC 920.39). El porcentaje de cenizas con la Ecuación 13 (AOAC 942.05) y fibra cruda con la Ecuación 14 (AOAC 991.42) de acuerdo con los procedimientos estándar de la AOAC (2002). Los resultados de composición proximal se expresaron en base húmeda. El contenido de carbohidratos se calculó por diferencia usando la Ecuación 15.

$$Humedad\ (\%)\ = \frac{mi-mf}{mi}\ x\ 100 \ldots (\textbf{Ec. 10})$$

Donde:

- mi: masa inicial de la muestra antes del secado analítico.
- mf: masa final de la muestra después del secado analítico.

$$Proteína\ (\%) = \%\ N\ x\ 6.25 \ldots (\textbf{Ec. 11})$$

Donde:

- $\%\ N$: porcentaje de Nitrógeno.
- 6.25: Factor de conversión proteica

$$Extracto\ etéreo\ (\%) = \frac{m\ extracto}{m\ muestra}\ x\ 100 \ldots (\textbf{Ec. 12})$$

Donde:

- $m\ extracto$: masa de grasa extraída.
- $m\ muestra$: masa de muestra utilizada para la extracción.

$$Cenizas\ (\%) = \frac{m\ cenizas}{m\ muestra}\ x\ 100\ (\textbf{Ec. 13})$$

Donde:

- $m\ cenizas$: masa residual mineral después de la incineración
- $m\ muestra$: masa de la muestra utilizada para la incineración.

$$Fibra\ (\%) = \frac{mr - mc}{m\ muestra}\ x\ 100 \quad \ldots(\textbf{Ec. 14})$$

Donde:

- mr: masa del residuo seco después de la digestión y filtración
- mc: masa de las cenizas obtenidas al incinerar el residuo
- $m\ muestra$: masa inicial de la muestra..

$$Carbohidratos\ (\%) = 100 - Humedad\ (\%) - Lipiidos\ (\%) - Proteína(\%) - Cenizas(\%) - Fibra(\%) \ldots(\textbf{Ec. 15})$$

4.3.2.2. **Valor de pH, acidez titulable y sinéresis.**

Las determinaciones se realizaron los días 1, 5, 10, y 15 de almacenamiento a 4 ± 1 º C, la determinación de pH se realizó usando un potenciómetro (pH 120, Conductronic, Puebla, México) a temperatura ambiente. Para la determinación de acidez titulable se realizó por titulación siguiendo la metodología propuesta por Abdeldaiem et al. (2023). Se tomaron 10 g de cada una de las muestras de yogur, posteriormente fueron agregados 3 gotas de indicador de fenolftaleína y se tituló con una solución estandarizada de NaOH 0.1 N en agitación hasta que persistió un color rosa pálido durante aproximadamente 15 segundos. La acidez titulable se midió con base en el ácido láctico, debido a que es el principal ácido orgánico en las muestras de yogur. Para la determinación de sinéresis se siguió la metodología propuesta por Anuyahong et al. (2020) con ligeras modificaciones. Se pesaron 20 g de cada tratamiento de yogur y se centrifugaron a 8000 rpm a 4 ± 1 °C durante 10 min en una centrífuga (5810 R, Eppendorf, AG, Hamburgo, Alemania), el valor de sinéresis se expresó como el volumen de líquido separado por 100 g de yogur.

4.3.2.3. **Determinación de color**

El color se determinó a temperatura ambiente (22 ± 1 °C) en 10 g de yogur en cajas Petri de 5 cm de diámetro empleando un colorímetro CR-400 (Konika Minolta, Inc., Tokio, Japón) en un ángulo de 10 grados. Las coordenadas CIE (Colorimetric Committee 1974) L, a* y b* fueron registradas donde L corresponde a la luminosidad, a* representa la escala de verde (- a) a rojo (+ a) y b* la escala de azul (- b) a amarillo (+ b) (Korley et al., 2015).

4.3.3. **Contenido de actividad antioxidante**

4.3.3.1. **Capacidad de eliminación de radicales DPPH**

Para el ensayo DPPH• (Hashemi y Jafarpour, 2020; Maniglia y Tapia-Blácido, 2016), con ligeras modificaciones, Se tomó una muestra de 1 mL de cada extracto de yogur y fue añadido 1 mL de solución de DPPH• (0,0642 mmol/L) diluido en etanol, posteriormente se incubó durante 30 min en oscuridad a temperatura ambiente. La absorbancia del DPPH• restante se midió en un espectrofotómetro a 517 nm (Hashemi y Jafarpour, 2020). La actividad eliminadora de radicales DPPH se reportó como porcentaje de inhibición de DPPH. La eliminación de radicales DPPH se calculó de acuerdo con la ecuación 16.

$$(\%)\ inhibición\ DPPH = \frac{Abs_{Control} - Abs_{extracto}}{Abs_{control}} x\ 100 \ldots\ldots\ldots \textbf{(Ec. 16)}$$

Donde:

(%) inhibición DPPH= % de la actividad captadora del radical DPPH

$Abs_{control}$= Absorbancia del control

$Abs_{extracto}$= Absorbancia de la muestra con extracto después de 30 minutos

4.3.3.2. **Capacidad de eliminación de radicales ABTS**

La actividad eliminadora de radicales ABTS se determinó siguiendo la metodología descrita por Nazari et al. (2023) con ligeras modificaciones. Se preparó una solución ABTS (7 mM) y se mezcló con persulfato de potasio

(2.45 mM), la solución se agitó hasta que la mezcla estuvo completamente diluida en el diluyente (agua destilada). La solución se dejó reposar en oscuridad a temperatura ambiente durante 16 h para alcanzar un nivel oxidativo estable. Una vez transcurrido el tiempo, la solución se diluyó con agua destilada hasta alcanzar una absorbancia de 0.700 ± 0.020 a 734 nm. Una vez obtenida la solución a la absorbancia necesaria, fue agregado 1 mL a 100 µL de extracto de yogur en viales con capacidad de 5 mL. Se registró la absorbancia usando un espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS (Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, Estados Unidos) a 734 nm después de 7 min de reacción. El porcentaje de inhibición de radical ABTS se calculó según la ecuación 17.

$$(\%)\ inhibición\ ABTS = \frac{Abs_{Control} - Abs_{extracto}}{Abs_{control}} x\ 100 \ldots\ldots\ldots \textbf{(Ec. 17)}$$

(%) inhibición ABTS= % de la actividad captadora del radical ABTS

$Abs_{control}$= Absorbancia del control

$Abs_{extracto}$= Absorbancia de la muestra con extracto después de 7 minutos

4.3.4. **Condiciones gastrointestinales simuladas**

Para evaluar el comportamiento del yogur durante condiciones gastrointestinales simuladas se utilizó la metodología propuesta por Hernández-Rodríguez (2017) con ligeras modificaciones, 1 g de cada muestra se colocó por separado en tubos conteniendo 9 mL de solución de jugo gástrico simulado (pH 3.0, HCl 0.1 N). Las muestras se incubaron a 37°C por 3 h en un baño de agitación orbital (Precision Scientific 360, Chicago, Illinois, EUA). Posteriormente, las muestras se filtraron; el filtrado se lavó con solución salina estéril y se depositó en 9 mL de una solución estéril (1 g 100 mL^{-1}) de extracto de bilis porcina (B8631, Sigma-Aldrich Chemical Co., St. Louis, Missouri, EUA) a pH 6.5. Los tratamientos se incubaron a 37°C por 3 h bajo agitación. Al final del período de incubación, se realizaron los ensayos

de DPPH y ABTS siguiendo la misma metodología descrita en la sección de contenido de actividad antioxidante de las muestras.

4.3.5. **Comportamiento reológico de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus***

4.3.5.1. **Propiedades de flujo**

Las mediciones oscilatorias dinámicas se llevaron a cabo utilizando un reómetro MCR 300 (Physica Messtechnik GmbH, Stuttgart, Alemania), con una geometría de cono-plato, en el que el plato giratorio tenía 49.925 mm de diámetro. Con un espacio de 0,05 mm. Se colocaron cuidadosamente aproximadamente 3.5 ml de muestra en el sistema de medición y se dejaron reposar durante 5 minutos para recuperar la estructura. Se utilizó un rango de tasa de corte de 0.1 a 50 s^{-1}**,** utilizando 50 puntos de medición distribuidos logarítmicamente a lo largo del rango. Durante el ensayo se registraron los valores de esfuerzo cortante (τ) y viscosidad aparente (η) en función de la tasa de deformación (γ̇), con el objetivo de determinar el comportamiento reológico en régimen estacionario. Todos los experimentos se llevaron a cabo a 4 °C. Los módulos de almacenamiento y pérdida se obtuvieron del software del equipo (RheoPlus/32 V2.62) en todos los casos. El análisis se realizó en cada variación del yogur de 3 días de almacenamiento (Karimi et al., 2019).

4.3.6. **Espectroscopía de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)**

Los espectros de las muestras se obtuvieron en un espectrómetro infrarrojo (Cary 630, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, EE. UU.) equipado con un accesorio de reflectancia total atenuado. Las muestras secas (~0,01 g) se colocaron en contacto con el accesorio de muestreo universal de diamante cristalino. Se obtuvieron mediciones en el rango de 4000-400 cm-1 a una resolución de 2 cm-1 (Sukhija et al., 2016). Se realizaron 3 escaneos por muestra, para identificar las bandas de estiramiento de los grupos funcionales presentes en la muestra, las cuales fueron integrados para obtener los valores medios del espectro (Bai et al., 2021).

4.3.7. **Análisis microestructural**

Se colocó una liguera película de las muestras de 0.05 mm sobre papel cera, fueron secadas (~0,01 g) en un horno de aire caliente Riossa Digital (HCF-62, Riossa Digital, México), posteriormente fueron pulverizadas en un Nutribullet (127V, Nutribullet, China). La microestructura de los yogures se examinó con un microscopio electrónico de barrido de alto vacío JEOL JSM6360LV (Jeol Ltd., Akishima, Japón) a 10 kV con aumentos de 1500 y 5000 × (Beveridge, Lawrence & Murray, 2007)

4.3.8. **Evaluación sensorial**

Los productos lácteos fermentados fueron evaluados sensorialmente por un panel de 80 estudiantes del Departamento de Preparatoria Agrícola-Universidad Autónoma Chapingo. Cada participante evaluó las cinco formulaciones de yogur batido, correspondientes a los dos controles y los tres tratamientos con harina de *Hericium erinaceus*. A las personas participantes, se les proporcionó 10 mL de la muestra y se les solicitó que indicaran el grado de aceptabilidad de los atributos (color, aroma, sabor, acidez apariencia, cremosidad, granularidad, sabor residual y global) de las muestras del yogur, para lo cual se utilizó una escala hedónica de 5 puntos en donde: 1= me disgusta mucho, 2= me disgusta moderadamente, 3= ni me disgusta ni me gusta, 4= me gusta moderadamente, 5= me gusta mucho (Hernández Rodríguez, 2017).

4.3.9. **Análisis estadístico**

Los resultados se expresaron como medias ± desviación estándar. Se realizaron análisis de varianza unidireccional (ANOVA) para comparar las formulaciones de yogur y los atributos por separado. Cuando se identificaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. Los análisis se realizaron utilizando el software Minitab (versión 22.4.0, State College, Pensilvania, EE. UU.).

4.4. **Resultados y discusión**

4.4.1. **Caracterización proximal del yogur adicionado con *Hericium erinaceus***

El yogur es uno de los productos lácteos fermentados de mayor consumo a nivel mundial debido a su aporte de macronutrientes esenciales como proteínas, carbohidratos y lípidos, asimismo, constituye una fuente relevante de micronutrientes, ya que contiene diversas vitaminas y minerales importantes para la alimentación, además de su valor nutricional, el yogur es apreciado por sus beneficios para la salud, por lo que se incluye con frecuencia en el consumo regular de diversos grupos de edades como alimento que contribuye tanto a la nutrición como al bienestar digestivo (Islam et al., 2025). La incorporación de ingredientes funcionales en el yogur representa una estrategia para mejorar sus características de calidad, sin embargo, este proceso implica evaluar las posibles modificaciones fisicoquímicas del producto, así como los cambios en su estabilidad, ya sea incremento o disminución de la misma, por ello la fortificación del yogur constituye un desafío en la ciencia de alimentos, debido a las alteraciones que estos ingredientes pueden generar en sus propiedades fisicoquímicas (Megrous et al., 2024). En este contexto, los resultados del análisis químico proximal de los yogures fortificados con *Hericium erinaceus* se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Contenido químico proximal de los yogures adicionados con pulverizado de *Hericium erinaceus*.

Parámetro (%)	Tratamientos				
	YCG_0	YBG_0	$YBG_{0.05}$	$YBG_{0.1}$	$YBG_{0.15}$

Proteína	14.51 ± 0.40^{c}	18.71 ± 0.39^{b}	18.84 ± 0.12^{b}	21.47 ± 0.43^{a}	21.99 ± 0.43^{a}
Humedad	11.51 ± 0.43^{c}	11.53 ± 0.09^{c}	11.80 ± 0.17^{c}	12.79 ± 0.49^{b}	14.14 ± 0.28^{a}
Grasa	0.68 ± 0.01^{a}	0.40 ± 0.02^{b}	0.39 ± 0.01^{b}	0.38 ± 0.01^{b}	0.36 ± 0.02^{b}
Ceniza	3.37 ± 0.11^{b}	3.98 ± 0.01^{a}	3.49 ± 0.07^{a,b}	3.66 ± 0.16^{a,b}	3.90 ± 0.15^{a}
Fibra	0.41 ± 0.08^{a}	0.33 ±0.01^{b}	0.34 ± 0.37^{b}	0.41 ± 0.48^{a}	0.42 ± 0.03^{a}
*Carbohidratos	69.52 ± 0.39^{a}	65.06 ± 0.22^{b}	65.04 ± 0.19^{b}	61.27 ± 0.30^{c}	59.19 ± 0.21^{d}

*Los carbohidratos fueron calculados por la diferencia de la suma de los componentes-100. Los valores corresponden a media ± desviación estándar. Los valores medios con diferentes superíndices dentro de una fila son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). YCG0: yogur completo en grasa, YBG0: yogur bajo en grasa, YBG0.05, YBG0.1, YBG0.15; Yogur adicionado 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE.

La textura del yogur está directamente relacionada con su contenido de sólidos totales, particularmente con la concentración de proteínas, grasa y otros componentes presentes, debido a ello, un mayor contenido de sólidos favorece la formación de una red proteica más densa y estable durante la fermentación, por esta razón, el análisis químico proximal constituye una herramienta fundamental para evaluar los cambios en la composición del yogur tras la incorporación de harinas u otros ingredientes funcionales (Rashwan et al., 2023).

El análisis químico proximal evidenció que la adición de *Hericium erinaceus* generó modificaciones significativas en la composición del yogur ($p \leq 0.05$), lo que confirma que la incorporación del pulverizado del hongo influye directamente en el equilibrio nutricional del producto. En el contenido de proteína, se observó un incremento significativo en los tratamientos adicionados con 0.1 y 0.15 % p/p, los cuales presentaron los valores más altos y difirieron estadísticamente de los tratamientos control, este comportamiento se explica parcialmente por la composición del cuerpo fructífero de *Hericium erinaceus*, el cual contiene compuestos bioactivos, incluyendo proteínas funcionales, péptidos y enzimas, con un contenido de proteína bruta que oscila entre el 22 y el 42% (Szućko-Kociuba et al., 2023). El aumento progresivo refleja que incluso niveles bajos de adición pueden contribuir al enriquecimiento proteico del yogur. Desde el punto de vista nutricional, este incremento resulta favorable, ya que mejora el aporte de macronutrientes sin comprometer la estabilidad del producto, no obstante, se debe considerar que estas diferencias no pueden atribuirse exclusivamente a la incorporación de harina de *Hericium erinaceus*, debido a que la concentración máxima añadida fue de 0.15 % p/p y la harina presentó un contenido de proteína de 14.84 %, a esta concentración, su contribución teórica sería de aproximadamente 0.022 g de proteína por cada 100 g de mezcla, por lo que resulta insuficiente para explicar por sí sola el incremento observado entre YBG_0 y $YBG_{0.15}$, es fundamental considerar las diferencias en las proporciones de leche entera y descremada utilizadas en las formulaciones, debido a que estos ingredientes contribuyen al contenido proteico del producto, además la pérdida de agua durante la semideshidratación puede elevar el porcentaje de proteína reportado en base húmeda, mientras que sus proporciones en base seca permanecen prácticamente constantes (Tussipov et al., 2026). Respecto al contenido de cenizas, también se registraron diferencias significativas entre tratamientos, particularmente en el tratamiento adicionado con 0.15 % p/p, las cenizas representan el residuo mineral total, por lo que su incremento indica una mayor contribución de minerales provenientes del hongo, tales

como potasio, fósforo, zinc, magnesio y otros micronutrientes característicos del hongo, este resultado sugiere que la fortificación con *Hericium erinaceus* no solo impacta el perfil proteico, sino también el contenido mineral del yogur, potenciando su valor funcional.

En relación con la humedad, se observó un aumento progresivo conforme se incrementó la concentración del *Hericium erinaceus*, este comportamiento se asocia a la capacidad de retención de agua de los polisacáridos estructurales presentes en la pared celular fúngica, como β-glucanos y quitina, los cuales favorecen la interacción con la fase acuosa del yogur, además de modificar la distribución de agua, este efecto puede tener implicaciones tecnológicas, particularmente en la textura y estabilidad del gel (Friedman, 2015). Por otra parte, el contenido de grasa fue significativamente mayor en el yogur control YCG_0 en comparación con los tratamientos bajos en grasa, sin que la adición de *Hericium erinaceus* generara variaciones significativas dentro de estos últimos, este resultado es consistente con el bajo contenido lipídico característico del hongo, lo que indica que su incorporación no altera sustancialmente este componente (Rashwan et al., 2023). Finalmente, los carbohidratos, determinados por diferencia, mostraron una disminución significativa conforme aumentó la concentración de *Hericium erinaceus*, esta reducción no implica necesariamente una pérdida real de azúcares, sino un ajuste proporcional derivado del incremento en proteína, cenizas y fibra. El aumento en los sólidos totales derivado de la adición de harinas funcionales resulta tecnológicamente favorable, ya que influye en la estructura del gel del yogur, en la actualidad diversos estudios han reportado que una mayor concentración de sólidos modifica la distribución de la red de caseína formada durante la fermentación, promoviendo un gel más compacto y estable, lo que contribuye a reducir la sinéresis y mejorar la consistencia del producto (Żulewska et al., 2025).

4.4.2. **Caracterización fisicoquímica del yogur adicionado con *Hericium erinaceus***

4.4.2.1. **Determinación de pH y acidez titulable a través del tiempo**

La producción comercial e industrial de yogur está influenciada por múltiples factores que abarcan desde la selección de cultivos iniciadores, el volumen de producción y el tipo de leche utilizada, hasta la temperatura de fermentación y las materias primas empleadas, los cuales determinan las características finales del producto (Rashwan et al., 2023). Entre los parámetros fisicoquímicos más importantes para evaluar la calidad del yogur se encuentran el pH y la acidez titulable. Estos indicadores no solo reflejan la progresión de la fermentación láctica, sino que también están estrechamente relacionados con la viabilidad, crecimiento y actividad metabólica de las bacterias ácido lácticas (BAL), incluyendo especies como *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus* (Jabłońska, 2025). Durante la fermentación, las BAL metabolizan la lactosa presente en la leche y producen ácido láctico como principal producto metabólico, lo que provoca una disminución progresiva del pH y el incremento de la acidez titulable. Este proceso conduce a la desestabilización de las micelas de caseína y a la formación de una red proteica tridimensional responsable de la textura característica del yogur, la interacción simbiótica entre *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii subsp*. *bulgaricus* favorece una fermentación más eficiente, ya que ambas especies intercambian metabolitos esenciales que estimulan su crecimiento y aceleran la producción de ácido láctico; en particular, *S. thermophilus* produce compuestos como ácido fórmico, dióxido de carbono y ciertos péptidos, los cuales estimulan el crecimiento de *L*. *delbrueckii subsp*. *bulgaricus*. A su vez, esta última especie presenta una elevada actividad proteolítica que genera aminoácidos libres y pequeños péptidos a partir de las proteínas de la leche, los cuales favorecen el desarrollo de *S*. *thermophilus* y contribuyen a intensificar la fermentación láctica (Hoxha et al., 2023; Ichimura, 2024). En las Figuras 2 y 3 se muestran los valores de pH y de acidez titulable, respectivamente, de los yogures control y los fortificados con *Hericium erinaceus*, donde es posible observar

la diferencia entre los yogures adicionados y los yogures control en función del tiempo de almacenamiento.

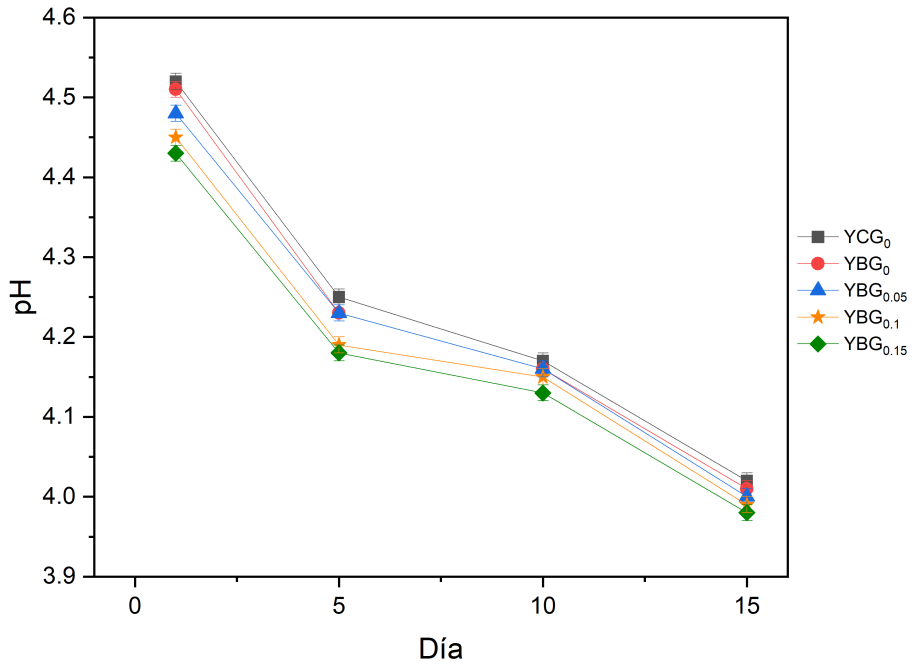


Figura 2. Valores de pH de los yogures durante 15 días de almacenamiento. Yogur adicionado 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE. YCG0: yogur completo en grasa (—■—), YBG0: yogur bajo en grasa (—●—), YBG0.05 (—▲—), YBG0.1 (—★—), YBG0.15 (—◆—); Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE

Durante el día 1, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). El pH osciló entre 4.43 y 4.52, teniendo ambos controles (YCG_0 y YBG_0) y el tratamiento $YBG_{0.05}$ los valor significativamente más altos, mientras que $YBG_{0.1}$ y $YBG_{0.15}$ presentaron los valores significativamente más bajos. Esto nos indica que desde el inicio del almacenamiento, la concentración más elevada de *Hericium erinaceus* favoreció una mayor producción inicial de ácido láctico (Jabłońska, 2025). La diferencia en los valores de pH se relaciona con la cantidad y tipo de ácidos orgánicos presentes, entre los que pueden destacar el ácido málico, cítrico, fumárico y succínico, los cuales contribuyen al equilibrio ácido–base del medio y participan como intermediarios metabólicos que facilitan el

crecimiento de bacterias ácido-lácticas (Yang et al., 2021). Los resultados sugieren que la adición de *Hericium erinaceus* favoreció una mayor acidificación del yogur, reflejada en valores de pH significativamente más bajos en los tratamientos $YBG_{0.1}$ y $YBG_{0.15}$, en contraste con los controles (YCG_0 y YBG_0), que conservaron valores de pH significativamente más elevados durante el almacenamiento. En el proceso de fermentación para la obtención de yogur, las bacterias ácido lácticas (BAL) convierten la lactosa en ácido láctico, este fenómeno explica la post-acidificación observada durante el almacenamiento (Rashwan et al., 2023; Nyanzi et al., 2021). En la presente investigación, todos los tratamientos, incluyendo los controles (YCG_0 y YBG_0) y las formulaciones adicionadas con *Hericium erinaceus* ($YBG_{0.05}$, $YBG_{0.1}$ y $YBG_{0.15}$) mostraron una reducción significativa del pH ($p \leq 0.05$) y un incremento de la acidez titulable durante el almacenamiento. En estudios recientes sobre yogures fortificados con ingredientes funcionales, Pham et al. (2024) señalan que la incorporación de extractos o compuestos bioactivos puede modificar de manera significativa la dinámica del pH y la acidez del producto. Este efecto puede atribuirse tanto a la presencia de sustancias que actúan como sustratos adicionales para las bacterias ácido lácticas (BAL), como a la liberación de ácidos orgánicos propios de los ingredientes funcionales adicionados. Por otro lado, la tendencia en los valores de pH obtenidos en esta investigación son comparables a los resultados informados por Attar et al. (2021), quienes evaluaron el efecto de la adición de *Pleurotus ostreatus* con una adición de 0.05, 0.1 y 0.2 % p/p en un producto lácteo fermentado durante 15 días, obteniendo valores de pH iniciales mayores en los yogures adicionados respecto al pH del yogur control, tendencia que se mantuvo a lo largo del almacenamiento, los investigadores atribuyen la diferencia en los valores de pH a la presencia del *P. ostreatus*, el cual contiene ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y enzimas los cuales sirvieron como prebióticos al incrementar la actividad metabólica de las BAL del yogur. Para que los productos lácteos fermentados fortificados o adicionados con probióticos, como el yogur, mantengan la viabilidad y la

actividad metabólica de las bacterias probióticas durante su vida útil, es fundamental que el medio presente un pH ácido controlado (4.6) y una acidez adecuada, al mismo tiempo que la presencia de ácidos orgánicos no ionizados (como lactato y acetato) contribuye a crear un ambiente que protege a las células probióticas del estrés ácido, modula su viabilidad durante el almacenamiento y facilita su resistencia frente a condiciones desfavorables en el tracto digestivo posterior al consumo (Li et al., 2025).

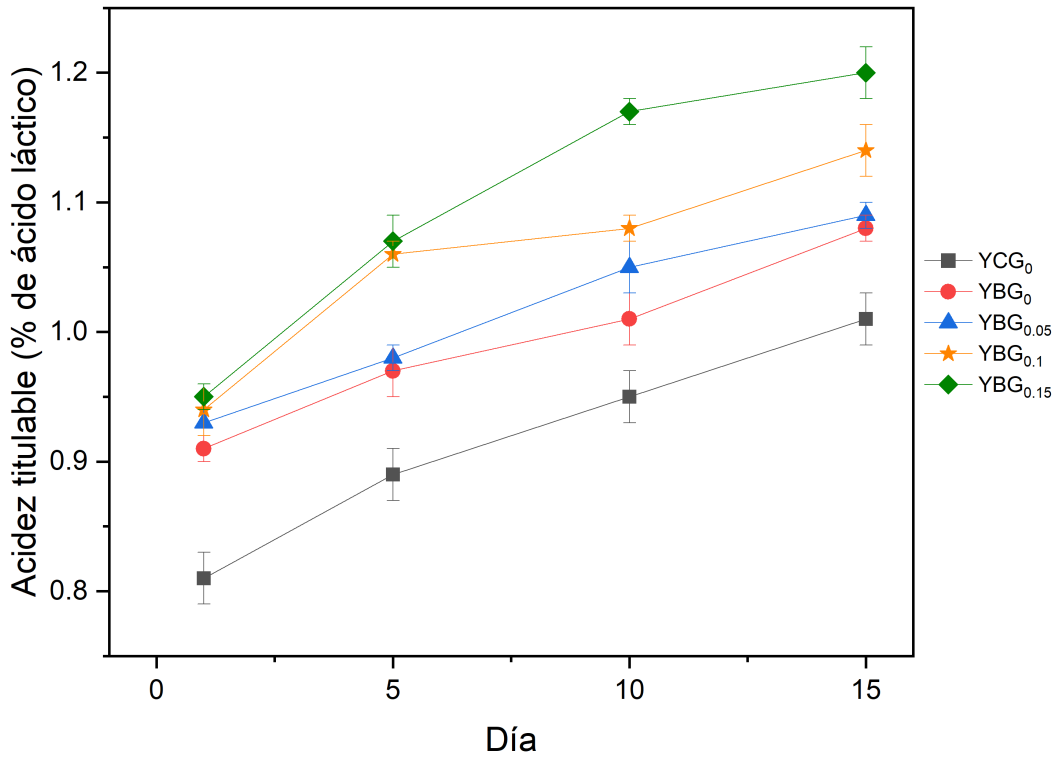


Figura 3. Valores de acidez titulable representada en % p/p de ácido láctico de los yogures durante 15 días de almacenamiento. Yogur adicionado 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE. YCG0: yogur completo en grasa (—■—), YBG0: yogur bajo en grasa (—●—), YBG0.05 (—▲—), YBG0.1 (—★—), YBG0.15(—◆—); Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE.

La acidez titulable mostró un incremento progresivo durante el periodo de almacenamiento, incluyendo los yogures control y los tratamientos, observándose diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Desde el día 1, los tratamientos con adición de *Hericium erinaceus* presentaron valores de

acidez significativamente mayores en comparación con el control YCG_0 el cual presentó una acidez de 0.81 ± 0.02 %, destacando $YBG_{0.1}$ y $YBG_{0.15}$ (0.94 ± 0.02 y 0.95 ± 0.01 % respectivamente) con los valores significativamente más elevados. Esta tendencia se mantuvo en los días 5, 10 y 15, en los que $YBG_{0.15}$ registró, al día 15, la mayor acidez (1.20 ± 0.02 %), mientras que YCG_0 presentó los valores más bajos (1.01 ± 0.02 %). Algunos autores han reportado que los productos lácteos fermentados deben estar en un rango de 0.7 a 1.2 % de ácido láctico, lo cual indica que el producto cumple con los criterios tecnológicos y de calidad aceptados para este tipo de matrices fermentadas.

Estudios recientes señalan que este rango garantiza características sensoriales adecuadas y estabilidad microbiológica en yogures convencionales y funcionales (İnce-Palamutoğlu et al., 2026).

Desde el punto de vista bioquímico, la relación inversa entre pH y acidez titulable se explica por la actividad metabólica de los cultivos iniciadores; en este estudio la fermentación fue producida por la acción y crecimiento de *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* y *Lactobacillus delbrueckii subsp. Lactis* cuya acción conjunta promueve la hidrólisis de la lactosa y su conversión en ácido láctico, este proceso incrementa progresivamente la acidez titulable y reduce el pH durante la fermentación y el almacenamiento refrigerado (Bratkič et al., 2025). En la Figura 2 se observa el incremento de la acidez titulable de los yogures control y fortificados con *Hericium erinaceus* en función del tiempo de almacenamiento. Los resultados evidencian un comportamiento dependiente de la concentración, ya que los tratamientos con mayores niveles de incorporación del hongo presentaron valores de acidez superiores en los días 10 y 15 en comparación con los yogures control. Este patrón sugiere que la adición del hongo favoreció la actividad fermentativa de las BAL, debido al aporte de polisacáridos estructurales, como los β-glucanos, los cuales pueden actuar como sustratos fermentables secundarios o ejercer un efecto

prebiótico dentro de la matriz láctea (Zhang et al., 2025). Diversos estudios han señalado que los polisacáridos provenientes de hongos comestibles pueden estimular el crecimiento y metabolismo de microorganismos fermentativos en productos lácteos, intensificando la producción de ácido láctico y, en consecuencia, la acidez titulable (Xu et al., 2022). Desde el punto de vista tecnológico, el incremento de la acidez puede contribuir positivamente a la estabilidad microbiológica del producto; no obstante, un aumento excesivo podría afectar la aceptabilidad sensorial, en particular por la percepción de un sabor más ácido. En este sentido, la concentración de *Hericium erinaceus* debe optimizarse cuidadosamente para mantener un equilibrio adecuado entre las propiedades funcionales y la calidad sensorial del yogur. En conjunto, el comportamiento observado entre la acidez titulable y el pH responde a la dinámica propia del sistema fermentado. Mientras que el pH refleja la concentración de protones libres en el medio, la acidez titulable representa la cantidad total de compuestos ácidos generados durante la fermentación, este fenómeno sugiere que medida que las BAL transforman la lactosa en ácido láctico, se incrementa la acumulación de ácidos orgánicos, lo que no solo eleva la acidez titulable, sino que también favorece la liberación de protones, provocando la disminución del pH; por ello, ambos parámetros evolucionan de manera inversa pero complementaria (Bratkič et al., 2025).

4.4.2.2. **Determinación de sinéresis a través del tiempo**

La determinación del porcentaje de sinéresis constituye un parámetro relevante en la evaluación de la calidad del yogur, ya que la separación de suero es percibida desfavorablemente por los consumidores, quienes suelen asociarla con deficiencias en la calidad del producto o en el control de su procesamiento. La sinéresis se produce cuando el suero es expulsado de la matriz del gel, estructura que se forma durante la fermentación al alcanzarse valores de pH cercanos al punto isoeléctrico de la caseína (pH= 4.6), lo que induce su precipitación y la conformación de la red proteica (Du et al., 2023, Vénica et al., 2023). Los resultados del porcentaje de sinéresis se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Sinéresis de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus.*

Parámetro (% p/p)	P.A. (días)	Tratamiento				
		YCG_0	YBG_0	$YBG_{0.05}$	$YBG_{0.1}$	$YBG_{0.15}$
Sinéresis	1	$5.88 \pm 0.02^{c,B}$	$9.79 \pm 0.05^{b,c,B}$	$10.48 \pm 0.03^{a,b,B}$	$11.44 \pm 0.08^{a,B}$	$13.06 \pm 0.36^{a,B}$
	5	$8.80 \pm 0.03^{c,B}$	$10.20 \pm 0.05^{b,c,B}$	$10.90 \pm 0.04^{a,b,B}$	$12.10 \pm 0.07^{a,B}$	$13.44 \pm 0.01^{a,B}$
	10	$9.50 \pm 0.12^{c,B}$	$14.63 \pm 0.17^{b,c,B}$	$13.89 \pm 0.12^{a,b,B}$	$12.87 \pm 1.33^{a,B}$	$17.93 \pm 0.35^{a,B}$
	15	$14.34 \pm 1.24^{c,A}$	$20.23 \pm 0.36^{b,c,A}$	$33.25 \pm 0.14^{a,b,A}$	$38.36 \pm 0.65^{a,A}$	$39.40 \pm 0.16^{a,A}$

P. A.: Periodo de almacenamiento. Los valores corresponden a media ± desviación estándar. Los valores medios con diferentes superíndices (en minúsculas en la misma fila; mayúsculas en la misma columna) son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). YCG0: yogur completo en grasa, YBG.0: yogur bajo en grasa, YBG0.05, YBG0.1, YBG0.15; Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE.

La adición de *Hericium erinaceus* influyó significativamente ($p \leq 0.05$) en el porcentaje de sinéresis de los yogures adicionados durante el periodo de almacenamiento. En el día 1, los tratamientos adicionados al 0.15, 0.1 y 0.05 % p/p presentaron valores de sinéresis significativamente superiores a los controles (13.06 ± 0.36, 11.44 ± 0.08 y 10.48 ± 0.03 %, respectivamente), observándose un incremento proporcional a la concentración adicionada. El control YCG_0 mostró una separación de suero significativamente menor (5.88 ± 0.02 %), seguido del control YBG_0 (9.79 ± 0.05 %). Durante el almacenamiento en los días 5 y 10, se mantuvo esta tendencia, registrándose un aumento progresivo de la sinéresis en todos los tratamientos, lo cual confirma que la liberación de suero es un fenómeno dependiente del tiempo; el tratamiento $YBG_{0.15}$ alcanzó un 17.93 ± 0.35 %, mientras que YCG_0 y YBG_0

permanecieron con valores significativamente más bajos (9.50 ± 0.12 y 14.63 ± 0.17 %, respectivamente). Estas diferencias se asocian a la reorganización estructural del gel, donde la contracción de la red de caseína y la formación de canales séricos favorecen la expulsión del suero (Leal et al., 2024). En el día 15 se observaron los valores más elevados y diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) tanto entre tratamientos como respecto al tiempo inicial, en consecuencia, los tratamientos $YBG_{0.15}$, $YBG_{0.1}$ y $YBG_{0.05}$ presentaron los porcentajes significativamente más altos (39.40 ± 0.16, 38.36 ± 0.65 y 33.25 ± 0.14 % respectivamente), en tanto que YCG_0 y YBG_0 mantuvieron los valores significativamente más bajos (14.34 ± 1.24 y 20.23 ± 0.36 %). Este comportamiento sugiere que, aunque la incorporación de biomasa fúngica aporta compuestos estructurales, su interacción con la red proteica de caseína en sistemas bajos en grasa puede alterar la continuidad del gel, generando heterogeneidad microestructural y favoreciendo la formación de poros dilatados y bolsas de suero (Lin et al., 2022). En consecuencia, la mayor concentración de sólidos no grasos procedentes de *Hericium erinaceus* intensificó la contracción del gel durante el almacenamiento, lo que promovió una macrosinéresis más pronunciada.

La reducción de sinéresis obtenida en los yogures fortificados con *Hericium erinaceus* son comparables con los obtenidos por (Vital et al., 2015), quienes evaluaron la adición de *Ganoderma lucidum* en concentraciones de 1.0 y 2.0 % p/p sobre las propiedades fisicoquímicas del yogur batido durante 14 días, en el último día de almacenamiento el yogur control obtuvo un valor de 28.3 ± 0.09 %, a diferencia de los yogures adicionados al 1 y 2 % p/p obtuvieron valores de 72.79 ± 0.32, 75.21 ± 0.10 %, respectivamente; los autores atribuyeron este fenómeno a la naturaleza estructural de los polisacáridos y la presencia de compuestos fenólicos y triterpenos en *Ganoderma lucidum*, además, informan que aunque contiene β-glucanos con capacidad de hidratación, una fracción importante corresponde a polisacáridos de alto peso molecular y componentes parcialmente insolubles que pueden interferir con la formación continua de la red de caseína.

La acidez y el pH están relacionados con la sinéresis, debido a que ambos factores fisicoquímicos disminuyen la estabilidad coloidal de las micelas de caseína, reduciendo la red del gel de caseína y afectando su capacidad de retención del suero (Alemán et al., 2023; Huang et al., 2021).

La sinéresis en el yogur está estrechamente relacionada con el pH y la acidez, ya que ambos factores afectan la estabilidad coloidal de las micelas de caseína y la integridad de la red proteica, a medida que el pH desciende hacia el punto isoeléctrico de la caseína (4.6), se reducen las repulsiones electrostáticas, lo que provoca la contracción del gel y disminuye su capacidad de retener agua, favoreciendo la expulsión de suero (Alemán et al, 2023). Asimismo, el incremento de la acidez durante el almacenamiento y la presencia de compuestos funcionales pueden intensificar la reorganización estructural del gel, generando una red más compacta pero también más rígida y susceptible a fracturas, lo que incrementa la sinéresis (Arab et al., 2022). En la Figura 4 se presenta una fotografía con los yogures control, así como los yogures adicionados al día 15.

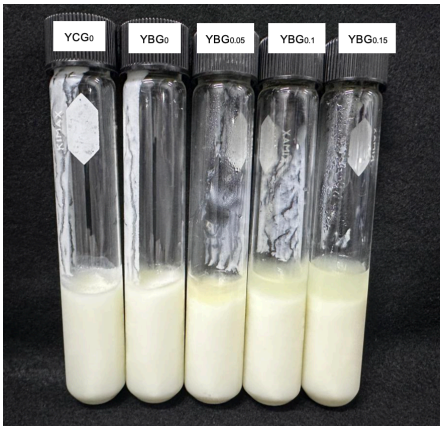


Figura 4. Yogures fortificados con *Hericium erinaceus* al día 15 de almacenamiento.

4.4.2.3. **Determinación de color a través del tiempo**

El color constituye uno de los parámetros fundamentales en la caracterización del yogur, dado que representa un atributo sensorial altamente influyente en la percepción del consumidor y, en consecuencia, en la aceptación o rechazo

inmediato del producto (Alemán et al., 2023). En la presente investigación, la evaluación del color se realizó mediante el sistema triestímulo de Hunter, considerando los parámetros CIE L*, a* y b*. El parámetro L* expresa la luminosidad en una escala de 0 (negro) a 100 (blanco); el eje a* (rojo–verde) indica tonalidades rojas cuando los valores son positivos y verdes cuando son negativos; mientras que el eje b* (amarillo–azul) presenta valores positivos asociados a tonalidades amarillas y negativos a tonalidades azules (Licona-Aguilar et al., 2023). En el Cuadro 7 se presentan los valores de L*, a* y b* determinados en los yogures analizados durante un periodo de almacenamiento de 15 días.

Cuadro 7. Color de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus.*

Parámetro	P.A. (días)	Tratamiento				
		YCG_0	YBG_0	$YBG_{0.05}$	$YBG_{0.1}$	$YBG_{0.15}$
L*	1	$70.95 \pm 0.47^{a,A}$	$70.37 \pm 0.48^{a,b,A}$	$71.03 \pm 0.81^{a,A}$	$68.97 \pm 0.40^{b,c,A,B}$	$68.50 \pm 0.52^{c,A,B}$
	5	$70.42 \pm 0.89^{a,b,A}$	$70.05 \pm 0.75^{a,b,A,B}$	$71.70 \pm 0.27^{a,A}$	$68.40 \pm 0.53^{b,B}$	$69.81 \pm 0.97^{a,b,A}$
	10	$68.31 \pm 1.03^{a,A}$	$68.58 \pm 0.92^{a,B,C}$	$71.12 \pm 0.91^{a,A}$	$69.05 \pm 0.20^{a,A,}$	$68.37 \pm 0.37^{a,A,B}$
	15	$69.74 \pm 0.69^{a,A}$	$68.17 \pm 0.21^{b,B,C}$	$70.27 \pm 0.20^{a,A}$	$69.09 \pm 0.14^{a,A}$	$68.22 \pm 0.07^{b,B}$
a*	1	$-2.61 \pm 0.05^{a,A}$	$-2.81 \pm 0.11^{a,b,A}$	$-3.05 \pm 0.01^{c,B}$	$-2.89 \pm 0.11^{b,c,B}$	$-2.80 \pm 0.08^{a,b,B}$

Parámetro	P.A. (días)	Tratamiento				
		YCG_0	YBG_0	$YBG_{0.05}$	$YBG_{0.1}$	$YBG_{0.15}$
	5	-2.40 ± 0.07^{a,A}	-2.57 ± 0.12^{a,b,A}	-2.65 ± 0.05^{b,c,A}	-2.64 ± 0.02^{b,c,A}	-2.82 ± 0.01^{c,A}
	10	-2.37 ± 0.11^{a,A}	-2.48 ± 0.06 ^{a,b,A}	-2.76 ± 0.02^{b,c,A}	-2.65 ± 0.12^{b,c,A}	-2.82 ± 0.01^{c,A}
	15	-2.32 ± 0.05^{a,A}	-2.45 ± 0.05^{a,b,A}	-2.61 ± 0.07^{b,c,A}	-2.71 ± 0.10^{c,A,B}	-2.75 ± 0.03^{c,A,B}

Cuadro 7 (continuación).

Parámetro	P.A. (días)	Tratamiento				
		YCG_0	YBG_0	$YBG_{0.05}$	$YBG_{0.1}$	$YBG_{0.15}$
b*	1	6.67 ± 0.06^{a,b,,A}	6.58 ± 0.27^{b,A}	7.02 ± 0.01^{a,b,A}	6.80 ± 0.09^{a,b,A}	7.05 ± 0.16^{a,A}
	5	6.55 ± 0.13^{b,A}	6.54 ± 0.03^{b,A}	6.68 ± 0.04^{a,b,B}	6.77 ± 0.03^{a,A}	6.77 ± 0.03^{a,A,B}
	10	6.25 ± 0.08^{c,B}	6.50 ± 0.04^{b,c,A}	6.71 ± 0.19^{a,b,B}	6.49 ± 0.05^{b,c,B}	6.91 ± 0.02^{a,A}
	15	6.41 ± 0.05^{b,A}	6.65 ± 0.06^{a,A}	6.75 ± 0.04^{a,B}	6.67 ± 0.03^{a,A}	6.59 ± 0.14^{a,b,B}

P. A.: Periodo de almacenamiento. Los valores corresponden a media ± desviación estándar. Los valores medios con diferentes superíndices (en minúsculas en la misma fila; mayúsculas en la misma columna) son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). YCG0: yogur completo en grasa, YBG.0: yogur bajo en grasa, YBG0.05, YBG0.1, YBG0.15; Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE.

Con base en los resultados presentados en el Cuadro 7, se observa que la luminosidad (L*) fue afectada significativamente ($p \leq 0.05$) tanto por el tipo de formulación como por el periodo de almacenamiento. En el día 1, el tratamiento $YBG_{0.05}$, YCG_0 y YBG_0 presentaron valores significativamente más altos de L* (71.03 ± 0.81, 70.95 ± 0.47 y 70.37 ± 0.48, respectivamente), mientras que $YBG_{0.15}$ y $YBG_{0.1}$ mostraron los valores significativos más bajos (68.50 ± 0.52 y 68.97 ± 0.40), lo que evidencia que la adición de *Hericium erinaceus* influyó en la claridad del producto. La incorporación del hongo, especialmente en bajas concentraciones (0.05 % p/p), promovió un incremento en el valor de L* respecto al control YBG_0. Asimismo, se aprecia una ligera disminución de L* en algunos tratamientos durante el almacenamiento, lo que podría asociarse a cambios estructurales en la red proteica y a la redistribución de partículas suspendidas que modifican la dispersión de la luz.

En cuanto al parámetro a*, todos los tratamientos presentaron valores negativos durante los 15 días de almacenamiento, lo que indica una tendencia hacia tonalidades verdes. Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos en cada periodo de almacenamiento. Al día 1, los yogures control (YCG_0 y YBG_0) y $YBG_{0.15}$ mostraron consistentemente los valores significativamente menos negativos (-2.61 ± 0.05, -2.81 ± 0.11 y -2.80 ± 0.08, respectivamente), mientras que los yogures adicionados con *Hericium erinaceus*, especialmente $YBG_{0.05}$ y $YBG_{0.1}$, presentaron valores significativamente más negativos (-3.05 ± 0.01 y -2.89 ± 0.11). Durante el almacenamiento, los valores de a* aumentaron ligeramente (menos negativos), lo que sugiere una leve reducción de la tonalidad verde con el tiempo.

Respecto al parámetro b*, todos los valores fueron positivos, lo que indica un predominio de tonalidades amarillas tanto en los controles como en los tratamientos. En el día 1, todos los tratamientos adicionados y el control YCG_0 presentaron valores significativamente más altos, diferenciándose

estadísticamente del control YBG_0. Sin embargo, conforme aumentó el almacenamiento, los valores de b* mostraron ligeras variaciones, con una tendencia general a disminuir en algunos tratamientos, aunque no de manera completamente uniforme; las diferencias significativas entre tratamientos se mantuvieron. En el día 15 los tratamientos, además del control (YBG_0), conservaron valores significativamente más elevados, mientras que YCG_0 presentó el valor significativamente más bajo (6.41 ± 0.05). Estos resultados sugieren que la adición de *Hericium erinaceus* contribuye a intensificar ligeramente la tonalidad amarilla del yogur, debido a la presencia de compuestos propios del hongo que influyen en las características cromáticas del producto.

Los resultados en conjunto indican que la adición de *Hericium erinaceus* modificó significativamente los atributos cromáticos del yogur, afectando la luminosidad y acentuando las tonalidades verde-amarillentas, con un efecto dependiente de la concentración y del tiempo de almacenamiento. Estos cambios se atribuyen principalmente a la ausencia de pigmentos oscuros como melaninas y a la predominancia de compuestos estructurales incoloros o ligeramente amarillentos en su carpóforo, sin embargo, cuenta con compuestos como β-glucanos y quitina que contribuyen a su apariencia clara (Kim, 2020). Los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con lo reportado en investigaciones en las que se han incorporado hongos comestibles en matrices lácteas fermentadas. Tupamahu Tupamahu, I. P. C., & Budiarso et al. (2017) evaluaron la adición de polvo de *Pleurotus ostreatus* en yogur y observaron una disminución significativa en los valores de L* en comparación con el control, atribuyendo este efecto a la presencia de pigmentos naturales y compuestos fenólicos propios del hongo, los cuales modificaron la dispersión de la luz y aumentaron la opacidad del producto. De manera similar, en investigaciones realizadas por Zhu et al (2023) en yogur fortificado con *Lentinula edodes*, se ha reportado que la incorporación de harina del carpóforo provoca variaciones en los parámetros a* y b*, intensificando tonalidades amarillentas y ligeramente verdosas, efecto

relacionado con la composición química del hongo y su interacción con la red proteica del yogur.

4.4.3. **Contenido de actividad antioxidante de los yogures a través del tiempo**

4.4.3.1. **Capacidad de eliminación de radicales DPPH**

El consumo de yogur se ha incrementado a nivel mundial en los últimos años, impulsado por el creciente interés en alimentos funcionales y saludables. Se estima que el mercado mundial del yogur alcanzó aproximadamente 144.29 mil millones de dólares en 2025, con una tasa de crecimiento anual cercana al 5.9 % entre 2025 y 2030 (Statista, 2026). En los últimos años, se ha observado una creciente tendencia hacia el desarrollo de yogures funcionales mediante la incorporación de ingredientes naturales ricos en compuestos bioactivos, como frutas, extractos vegetales, hongos, semillas y subproductos agroindustriales, con el objetivo de mejorar su capacidad antioxidante y su valor nutricional (Rashwan et al., 2023). En el Cuadro 8 se muestran los porcentajes de inhibición del radical DPPH de los yogures, tanto el control como los adicionados con *Hericium erinaceus*, almacenados durante 15 días a 4 ± 1 °C.

Cuadro 8. Actividad de eliminación de radicales DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo) en yogur adicionado con *Hericium erinaceus* durante almacenamiento durante 15 días.

Parámetro	P.A. (días)	Tratamiento				
		YCG_0	YBG_0	$YBG_{0.05}$	$YBG_{0.1}$	$YBG_{0.15}$
Inhibición de DPPH (%)	1	$53.37 \pm 0.72^{c,B}$	$55.75 \pm 0.65^{b,B}$	$55.89 \pm 0.59^{b,C}$	$56.50 \pm 0.98^{a,b,D}$	$57.83 \pm 0.54^{a,D}$
	5					

	55.85 ± 0.70^{c,B}	56.82 ± 0.64^{c,b,B}	58.51± 0.49^{b,B,C}	60.67 ± 0.79^{a,C}	62.14 ± 0.52^{a,C}
10	56.28 ± 0.70^{c,B}	58.01± 0.66^{c,B}	60.38 ± 0.62^{b,B}	62.86 ± 0.99^{a,B}	63.94 ± 0.91^{a,B}
15	59.84 ± 0.68^{c,A}	61.03 ± 0.90^{b,c,A}	62.18 ± 0.43^{b,A}	64.98 ± 0.81^{a,A}	65.56 ± 0.51^{a,A}

P. A.: Periodo de almacenamiento. Los valores corresponden a media ± desviación estándar. Los valores medios con diferentes superíndices (en minúsculas en la misma fila; mayúsculas en la misma columna) son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). YCG0: yogur completo en grasa, YBG0: yogur bajo en grasa, YBG0.05, YBG0.1, YBG0.15; Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE. Los valores correspondientes a media ± desviación estándar. *Hericium erinaceus* (HE).

La actividad antioxidante determinada mediante el ensayo DPPH mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) tanto entre tratamientos como a lo largo del periodo de almacenamiento. En el día 1, los valores de inhibición oscilaron entre 53.37 y 57.83 %, donde los tratamientos $YBG_{0.15}$ y $YBG_{0.1}$ presentaron significativamente la mayor actividad antioxidante (57.83 ± 0.54 y 56.50 ± 0.98), mientras que el yogur control YCG_0 mostró significativamente el valor más bajo (53.37 ± 0.72), evidenciando un efecto dependiente de la concentración, ya que a mayor nivel de *Hericium erinaceus* se registraron mayores porcentajes de eliminación de radicales libres. Conforme avanzó el periodo de almacenamiento, la actividad antioxidante se incrementó gradualmente en todos los tratamientos, alcanzando en el día 15 valores entre 59.84 y 65.56 %. Los resultados sugieren que la incorporación de *Hericium erinaceus* contribuye a incrementar la capacidad antioxidante del yogur, debido a la presencia de compuestos bioactivos como polisacáridos, compuestos fenólicos y ergotioneína, los cuales poseen capacidad para donar electrones y neutralizar radicales libres; asimismo, el incremento observado durante el almacenamiento podría atribuirse a la actividad metabólica de las BAL las cuales pueden liberar o transformar compuestos antioxidantes

durante la fermentación y el almacenamiento, aumentando la capacidad de eliminación del radical DPPH (Jabłońska-Ryś, 2025; Atik et al., 2024).

4.4.3.2. **Capacidad de eliminación de radicales ABTS**

Los organismos vegetales y fúngicos sintetizan compuestos fenólicos y otros metabolitos secundarios como parte de sus mecanismos de defensa frente al estrés ambiental, patógenos y depredadores (Li et al., 2023). Estos compuestos bioactivos han despertado un creciente interés en la industria alimentaria debido a su capacidad antioxidante, basada en su capacidad para neutralizar radicales libres, actuar como agentes reductores y quelar iones metálicos prooxidantes, contribuyendo así a la estabilidad oxidativa de los alimentos y a la prevención del daño oxidativo en sistemas biológicos. En particular, los hongos comestibles, funcionales y medicinales han sido reconocidos como fuentes importantes de polisacáridos bioactivos, especialmente β-glucanos, así como terpenoides y otros metabolitos que contribuyen significativamente a su capacidad antioxidante y a diversos efectos biológicos, incluyendo propiedades inmunomoduladoras, antiinflamatorias y cardioprotectoras que favorecen su aplicación en alimentos funcionales (Abdelshafy et al., 2021).

El ensayo ABTS es un método basado en la decoloración de un radical estable que se utiliza para evaluar la capacidad antioxidante frente a radicales derivados de peróxidos lipídicos y radicales presentes en medios acuosos (El-Said et al., 2014). En el Cuadro 9 se muestran los porcentajes de inhibición del radical ABTS de los yogures control y adicionados con *Hericium erinaceus*, almacenados durante 15 días a 4 ± 1 °C.

Cuadro 9. Actividad de eliminación de radicales ABTS (2,2'–azino–bis–(3-etilbenzotiazolin–6–sulfónico) en yogur adicionado con *Hericium erinaceus* durante almacenamiento durante 15 días.

Parámetro	P.A. (días)	Tratamiento				
		YCG_0	YBG_0	$YBG_{0.05}$	$YBG_{0.1}$	$YBG_{0.15}$
Inhibición de ABTS (%)	1	22.26 ± 0.22^{d,D}	25.65 ± 1.74^{c,C}	52.88 ± 0.73^{b,D}	55.19 ± 0.66^{b,D}	59.49 ± 0.58^{a,C}
	5	23.02 ± 0.10^{e,C}	26.83 ± 0.16^{d,C}	56.15 ± 0.38^{c,C}	59.03 ± 0.30^{b,C}	59.97 ± 0.40^{a,C}
	10	27.89 ± 0.10^{e,B}	31.75 ± 0.89^{d,B}	57.51 ± 0.47^{c,B}	61.22 ± 0.39^{b,B}	62.83 ± 0.23^{a,B}
	15	33.32 ± 0.22^{e,A}	33.16 ± 0.43^{d,A}	62.61± 0.13^{c,A}	69.62 ± 0.34^{b,A}	70.56 ± 0.31^{a,A}

P. A.: Periodo de almacenamiento. Los valores corresponden a media ± desviación estándar. Los valores medios con diferentes superíndices (en minúsculas en la misma fila; mayúsculas en la misma columna) son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). YCG0: yogur completo en grasa, YBG0: yogur bajo en grasa, YBG0.05, YBG0.1, YBG0.15; Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE. Los valores correspondientes a media ± desviación estándar. *Hericium erinaceus* (HE).

La actividad antioxidante determinada mediante el ensayo ABTS mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos y a lo largo del periodo de almacenamiento. En el día 1, los valores de inhibición variaron entre 22.26 y 59.49 %, donde el tratamiento control YCG_0 presentó significativamente el valor más bajo de actividad antioxidante (22.26 ± 0.22 %) y $YBG_{0.15}$ el valor más alto (59.49 ± 0.58 %). La capacidad antioxidante mostró un comportamiento dependiente de la concentración, aumentando a medida que aumentó la proporción de *Hericium erinaceus* en el yogur batido. Durante el almacenamiento, se observó un incremento progresivo en la actividad antioxidante en todos los tratamientos, alcanzando en el día 15

valores entre 33.16 y 70.56 %. Los yogures adicionados con *Hericium erinaceus* mantuvieron consistentemente un incremento, destacando el tratamiento $YBG_{0.15}$, que presentó significativamente la mayor actividad antioxidante (70.56 ± 0.31 %), seguido por $YBG_{0.1}$ (69.62 ± 0.34 %) y $YBG_{0.05}$ (62.61 ± 0.13 %). Por otro lado, los tratamientos control mostraron incrementos más moderados, con valores cercanos al 33 % al final del almacenamiento. El aumento de la actividad antioxidante en los yogures adicionados se atribuye a la presencia de compuestos bioactivos característicos de *Hericium erinaceus*, tales como polisacáridos, β-glucanos, compuestos fenólicos y otros metabolitos con capacidad reductora, los cuales contribuyen a la neutralización de radicales libres (Qiu et al., 2023; Li et al., 2023).

4.4.4. **Condiciones gastrointestinales simuladas**

La simulación gastrointestinal empleada en esta investigación corresponde a un modelo *in vitro* diseñado para reproducir de manera simplificada las condiciones fisicoquímicas del tracto digestivo. Este enfoque se basa principalmente en la variación del pH, que simula la acidez gástrica, y en la presencia de sales biliares, lo que permite aislar el efecto de estas sobre la estabilidad y la liberación de compuestos presentes en el yogur. Su aplicación es relevante en estudios de funcionalidad, ya que permite analizar las modificaciones en propiedades como la actividad antioxidante durante el proceso digestivo; de esta manera, se obtiene una aproximación más realista del efecto biológico de los compuestos bioactivos. En este contexto, la simulación resulta fundamental para evaluar el comportamiento de los compuestos bioactivos aportados por *Hericium erinaceus* al ser incorporados en el yogur bajo condiciones semejantes a las del tracto gastrointestinal, ya que factores como la acidez gástrica y el ambiente intestinal pueden inducir cambios estructurales en la matriz del yogur, además de favorecer en los compuestos bioactivos del hongo su liberación o degradación (Luo et al., 2022; Carbonell-Capella et al., 2014; Alegría et al., 2015; L. Wang et al.,

2021). En las Figuras 5 y 6 se muestran los porcentajes de inhibición de los radicales DPPH y ABTS en los yogures control y adicionados con *Hericium erinaceus*.

Los valores iniciales de actividad antioxidante determinados mediante los ensayos DPPH y ABTS, previamente reportados (Capítulo 4, Sección 4.4.3.), se utilizaron como punto de referencia para el análisis comparativo. Bajo este enfoque, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre las fases de la simulación gastrointestinal en ambos métodos.

La actividad antioxidante determinada mediante el ensayo DPPH se redujo significativamente ($p \leq 0.05$) en la fase gástrica en todos los tratamientos, respecto al tiempo inicial; se mantuvo la misma tendencia, siendo $YBG_{0.15}$ considerablemente superior (44.03 ± 0.96 %), con una protección del 76 % de la capacidad antioxidante, en tanto que YCG_0 fue significativamente menor (14.48 ± 0.53 %), conservando el 27 % de su actividad. Este comportamiento puede explicarse por el mayor contenido de β-glucanos aportados por *Hericium erinaceus*, los cuales han sido asociados con efectos protectores y una mayor estabilidad de la actividad antioxidante bajo condiciones experimentales simuladas, a diferencia de los tratamientos control que no incorporan estos compuestos (Zhuang et al., 2023).

Durante la fase intestinal, se observó un descenso adicional de la actividad antioxidante en todos los tratamientos. $YBG_{0.15}$ mantuvo el valor significativamente más alto (36.73 ± 0.59 %), lo que corresponde a una pérdida del 37 % de la actividad antioxidante, mientras que YCG_0 presentó la menor estabilidad (10.78 ± 0.20 %), con una reducción del 80 %. Estos resultados indican que una mayor incorporación de *Hericium erinaceus* contribuye a una mayor estabilidad de los compuestos antioxidantes después de la exposición a condiciones ácidas y sales biliares. Para $YBG_{0.05}$ y $YBG_{0.1}$, se registraron disminuciones intermedias (50 y 44 %, respectivamente), lo que sugiere un efecto dependiente de la concentración de compuestos bioactivos, suficiente para mejorar la estabilidad respecto al control, aunque menor en

comparación con concentraciones más elevadas (Wang et al., 2021; Zhuang et al., 2023).

De manera similar, el ensayo ABTS evidenció diferencias significativas ($p \leq 0.05$) durante la fase gástrica. Los tratamientos adicionados con *Hericium erinaceus* presentaron valores superiores de actividad antioxidante, destacando $YBG_{0.15}$ (48.96 ± 0.33 %), seguido de $YBG_{0.05}$ (42.42 ± 0.96 %), los cuales corresponden a niveles de protección del 82 y 80 % de la actividad antioxidante, respectivamente. En contraste, YCG_0 y YBG_0 mostraron niveles de protección considerablemente menores (73 y 68 %, respectivamente). Estos resultados confirman que la incorporación de *Hericium erinaceus* favorece la estabilidad de los compuestos antioxidantes después de la exposición a condiciones ácidas, lo que se interpreta como una mayor capacidad de neutralización de radicales libres en comparación con los sistemas sin adición (Wang et al., 2021).

Bajo condiciones intestinales simuladas, se mantuvo la misma tendencia entre los tratamientos. $YBG_{0.15}$ presentó el valor más alto (46.01 ± 0.14 %), con una pérdida del 23 % de su actividad antioxidante, seguido de $YBG_{0.05}$ (35.28 ± 1.00 %), con una reducción del 33 %. En sentido opuesto, YBG_0 y YCG_0 mostraron los valores más bajos (16.86 ± 1.20 y 13.16 ± 0.55 %, respectivamente), asociados con pérdidas de 34 y 41 %. Este comportamiento sugiere que la incorporación de *Hericium erinaceus* contribuye a mantener una mayor actividad antioxidante después de la exposición a las condiciones experimentales evaluadas, probablemente debido a la presencia de compuestos bioactivos, como los β-glucanos, que que podrían contribuir a la actividad antioxidante observada (Wang et al., 2014). Asimismo, las diferencias observadas entre los ensayos DPPH y ABTS pueden atribuirse a la naturaleza de los compuestos evaluados, ya que el ensayo ABTS permite detectar antioxidantes tanto hidrofílicos como lipofílicos, mientras que DPPH presenta mayor afinidad por compuestos menos polares. En este sentido, los porcentajes de inhibición obtenidos

mediante ABTS fueron consistentemente mayores que los determinados por DPPH en todos los tratamientos, lo que indica que, en el yogur adicionado con *Hericium erinaceus*, predominan compuestos de carácter polar (hidrofílicos), responsables de la mayor respuesta antioxidante observada con este método (El-Maradny et al., 2025; Liuzzi et al., 2023).

Las tendencias observadas en ambos ensayos pueden atribuirse a cambios fisicoquímicos inducidos durante la simulación gastrointestinal. En la fase gástrica, el pH ácido puede provocar la desestabilización de la matriz alimentaria, favorecer la desnaturalización de las proteínas lácteas y alterar la estructura del sistema. Asimismo, puede producirse la degradación parcial de compuestos como péptidos bioactivos, en particular los susceptibles a condiciones ácidas, lo que reduce su capacidad antioxidante. Estos resultados coinciden con lo reportado en estudios recientes, en los que se ha observado que los tratamientos que simulan determinadas condiciones gastrointestinales pueden modificar significativamente la actividad antioxidante de los hongos comestibles, ya sea mediante la liberación de compuestos bioactivos o mediante cambios en su biodisponibilidad (C. Wang et al., 2014; Qin et al., 2025).

En la fase intestinal, la disminución adicional de la actividad antioxidante puede asociarse a la acción de las sales biliares, las cuales actúan como agentes tensoactivos, favoreciendo la emulsificación y solubilización de compuestos parcialmente hidrofóbicos, este proceso puede modificar la forma en que los compuestos bioactivos se encuentran disponibles en el medio, promoviendo su dispersión (Wang et al., 2021; Ng y Rosman, 2019). Cabe señalar que el modelo empleado evaluó la actividad antioxidante bajo condiciones ácidas y en presencia de sales biliares, sin incorporar enzimas digestivas. Por tanto, los resultados describen los cambios en la actividad antioxidante bajo las condiciones experimentales evaluadas y no representan una digestión gastrointestinal completa.

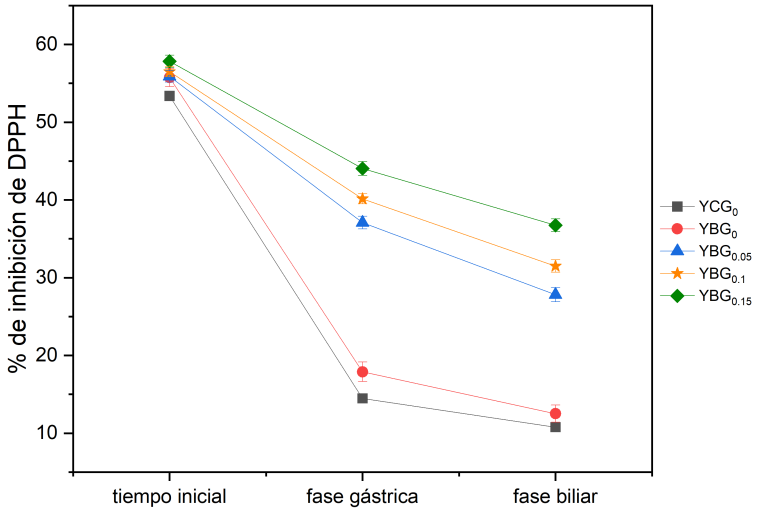


Figura 5. Valores de porcentaje de inhibición de DPPH de los yogures durante el día cero de almacenamiento, fase gástrica y fase con sales biliares. YCG_0: yogur completo en grasa (—■—), YBG_0: yogur bajo en grasa (—●—), $YBG_{0.05}$ (—▲—), $YBG_{0.1}$ (—★—), $YBG_{0.15}$ (—◆—); Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE.

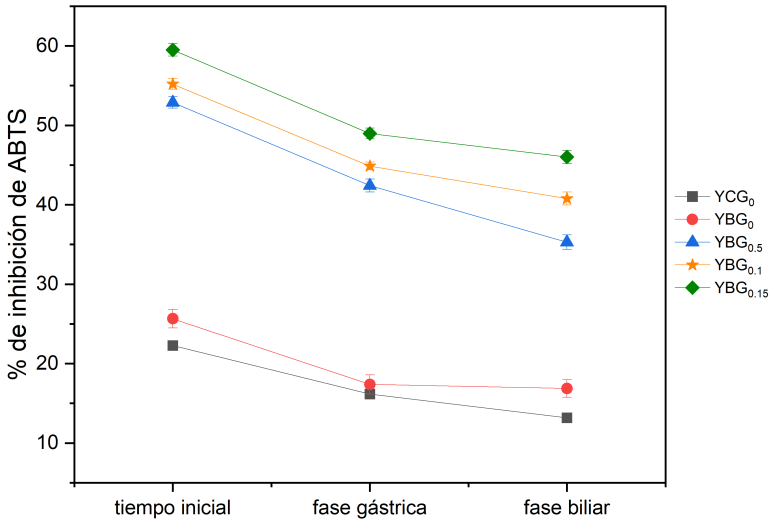


Figura 6. Valores de porcentaje de inhibición de ABTS de los yogures durante el día cero de almacenamiento, fase gástrica y fase con sales biliares. YCG_0: yogur completo en grasa (—■—), YBG_0: yogur bajo en grasa (—●—), $YBG_{0.05}$ (—▲—), $YBG_{0.1}$ (—★—), $YBG_{0.15}$ (—◆—); Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE.

4.4.5. **Comportamiento reológico de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus***

4.4.5.1. **Propiedades de flujo**

En la Figura 7 se muestran los valores de la viscosidad aparente de los yogures control y adicionados con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de *Hericium erinaceus* en función de la tasa de corte. Todos los tratamientos presentaron un comportamiento característico de fluidos pseudoplásticos o adelgazantes por cizalla, este comportamiento se atribuye a la ruptura progresiva de la red estructural del gel y a la alineación de las macromoléculas en la dirección del flujo cuando se aplica un esfuerzo cortante, estas interacciones incluyen la retención de agua, incremento de la viscosidad del suero y refuerzo físico de la red proteica, lo que en conjunto mejora la estabilidad del gel. Este comportamiento es común en productos lácteos fermentados como el yogur, y se atribuye a la desestructuración parcial de la red de caseínas bajo esfuerzo mecánico. Desde un punto de vista tecnológico, este comportamiento resulta deseable, ya que el producto mantiene una consistencia firme en reposo y fluye fácilmente al ser agitado o consumido, mejorando su aceptabilidad sensorial **(**Chen et al., 2023). Asimismo, la viscosidad es un parámetro clave en el yogur debido a su relación directa con la textura percibida por el consumidor; desempeña un papel importante en la preferencia y aceptación del producto por los consumidores (Alemán et al., 2023). Para la comparación entre tratamientos, se seleccionó una velocidad de corte de 50 s^{-1}, que simula condiciones de consumo en boca (Dong et al., 2022), lo que permite una interpretación más representativa del comportamiento del producto en condiciones reales.

Para describir cuantitativamente este comportamiento reológico, se empleó el modelo de Carreau el cual es ampliamente utilizado para describir el comportamiento de fluidos no newtonianos, como el yogur, en los que la viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de cizalla. Este modelo permite caracterizar la transición entre la viscosidad a bajas tasas de corte y la región de adelgazamiento por cizalla. Sus parámetros aportan información clave

sobre la estructura del sistema, la viscosidad a tasa de corte cero refleja la resistencia inicial al flujo, el tiempo de relajación describe la respuesta del material frente a la deformación, y el índice de adelgazamiento indica el grado de disminución de la viscosidad con la cizalla.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{(1+(\lambda_1\dot{\gamma})^2)^{pc}} \text{..... Ecuación 18}$$

Donde: η=viscosidad aparente, γ = tasa de corte, η_0= viscosidad a baja tasa de corte, λ = tiempo constante asociado al tiempo de relajación p = índice de adelgazamiento al corte

Los datos experimentales se ajustaron (R^2= 0.97) al modelo de Carreau, lo que indica una adecuada descripción del comportamiento reológico de los yogures evaluados. Los parámetros obtenidos a partir de este modelo se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Valores medios de los parámetros del modelo de Carreau.

Tratamiento	λ (s)	p	η0 (Pa.s)
YCG_0	0.327 ± 0.02^{d}	0.60 ± 0.02^{b}	562.80 ± 2.54^{d}
YBG_0	0.712 ± 0.01^{a}	0.47 ± 0.03^{c}	815.29 ± 25.89^{a}
$YBG_{0.05}$	0.359 ± 0.02^{d}	0.61 ± 0.02^{a,b}	616.61 ± 14.67^{c}
$YBG_{0.1}$	0.432 ± 0.01^{c}	0.65 ± 0.02^{a,b}	620.33 ± 20.04^{c}
$YBG_{0.15}$	0.478 ± 0.01^{b}	0.67 ± 0.03^{a}	693.15 ± 8.32^{b}

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre medias (p ≤ 0.05).

En el tiempo de relajación, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El control YBG_0 presentó el valor significativamente más alto (0.712 ± 0.01 s), lo que indica una mayor resistencia de la estructura frente a la deformación y una respuesta más lenta al esfuerzo aplicado. En contraste,

el tratamiento $YBG_{0.05}$ y el control YCG_0 mostraron valores significativamente más bajos (0.359 ± 0.02 y 0.327 ± 0.02 s, respectivamente), lo que sugiere una estructura menos organizada. La adición de *Hericium erinaceus* produjo un incremento progresivo de λ conforme aumentó su concentración, lo que indica que compuestos como polisacáridos, principalmente β-glucanos, fibra dietética y otros compuestos bioactivos se relacionan con la matriz proteica a través de interacciones hidrofóbicas y electrostáticas, favoreciendo la formación de una estructura más estable y resistente a la deformación (Bains et al., 2021).

En relación con la viscosidad a baja tasa de corte, se observaron diferencias significativas entre controles y tratamientos. El control YBG_0 presentó un valor significativamente más alto (815.29 ± 25.89 Pa·s), lo que indica una mayor consistencia y una red estructural más desarrollada. Este comportamiento se atribuye a la reformulación del sistema bajo en grasa, en la que la ausencia de lípidos favorece las interacciones proteína-proteína, lo que genera una red más compacta y resistente al flujo. Por el contrario, YCG_0 mostró un valor significativamente más bajo (562.80 ± 2.54 Pa·s) lo que indica una estructura menos organizada. Este comportamiento se explica por la presencia de grasa que interfiere parcialmente con la formación de la red de caseínas, actuando como fase dispersa, la cual debilita la estructura continua del gel (Ilić et al., 2024). La adición de *Hericium erinaceus* en los yogures bajos en grasa produjo valores intermedios de viscosidad inicial, observándose un incremento progresivo conforme aumentó la concentración del hongo, particularmente en $YBG_{0.15}$ (693.15 ± 8.32 Pa·s), mientras que $YBG_{0.05}$ y $YBG_{0.1}$ no mostraron diferencias significativas entre sí, los resultados nos indican que a bajas concentraciones de *Hericium erinaceus* el efecto estructural aún es limitado, pero conforme va incrementando la concentración se vuelve más evidente (Chen et al., 2023). El orden observado entre tratamientos indica que la adición de *Hericium erinaceus* no supera por completo el efecto estructurante del sistema en YBG_0, pero sí mejora progresivamente la consistencia en comparación con las formulaciones con

menor concentración. La incorporación de *Hericium erinaceus* podría influir en esta estructura debido a la presencia de polisacáridos y compuestos fibrosos del hongo, que pueden interactuar con la matriz proteica del yogur mediante enlaces físicos débiles o interacciones electrostáticas, lo que favorece la formación de una red más estable y modifica su comportamiento reológico. Desde un punto de vista tecnológico, esto resulta relevante, ya que permite mejorar la textura de yogures bajos en grasa sin necesidad de añadir hidrocoloides sintéticos (Chen et al, 2024).

En sistemas como el yogur, la viscosidad a bajas tasas de corte se asocia principalmente con el grado de interacción entre las micelas de caseína y la formación de una red tridimensional capaz de retener agua y otros componentes del sistema (Taşdemir & Gölge, 2023). Por lo tanto, las diferencias en este parámetro reflejan cambios directos en la microestructura del yogur batido.

Bajo condiciones referentes al índice de adelgazamiento por cizalla, todos los tratamientos presentaron valores < 1; este valor indica que el yogur es cremoso y espeso cuando está en reposo, pero se vuelve más fluido y fácil de ingerir, lo que confirma el comportamiento pseudoplástico característico del yogur (Mendoza et al., 2021). El control YBG_0 mostró un valor de índice de adelgazamiento al corte más bajo (0.47 ± 0.03), lo que indica una mayor sensibilidad a la cizalla y, por lo tanto, una disminución más pronunciada de la viscosidad al aumentar la velocidad de corte. En cambio, los tratamientos con adición de *Hericium erinaceus* presentaron valores de p significativamente más altos, lo que indica una menor dependencia de la viscosidad respecto a la cizalla. Este comportamiento se atribuye a una menor susceptibilidad de la estructura a la desorganización bajo cizalla, lo que indica que la red del gel presenta una mayor estabilidad frente al esfuerzo mecánico. En estas condiciones, la alineación de las macromoléculas en la dirección del flujo ocurre en menor medida, reduciendo la caída de la viscosidad con el incremento de la tasa de corte (Marlapati et al., 2024).

Los valores obtenidos para los parámetros del modelo de Carreau evidencian diferencias significativas en el comportamiento reológico de los yogures evaluados; estos parámetros permiten no solo comparar cuantitativamente los tratamientos, sino también inferir cambios en la microestructura del yogur, tales como la densidad de la red proteica, la interacción entre componentes y la estabilidad del sistema frente a esfuerzos mecánicos (Taşdemir & Gölge, 2023).

Estudios realizados por Ge et al. (2025) informaron que los polisacáridos provenientes de hongos comestibles de la especie *Hericium spp.* pueden actuar como agentes estructurantes o hidrocoloides naturales, favoreciendo la retención de agua y el fortalecimiento de la red proteica en productos lácteos fermentados, los cuales pueden actuar como agentes espesantes naturales, incrementando la viscosidad del sistema y mejorando su estabilidad estructural.

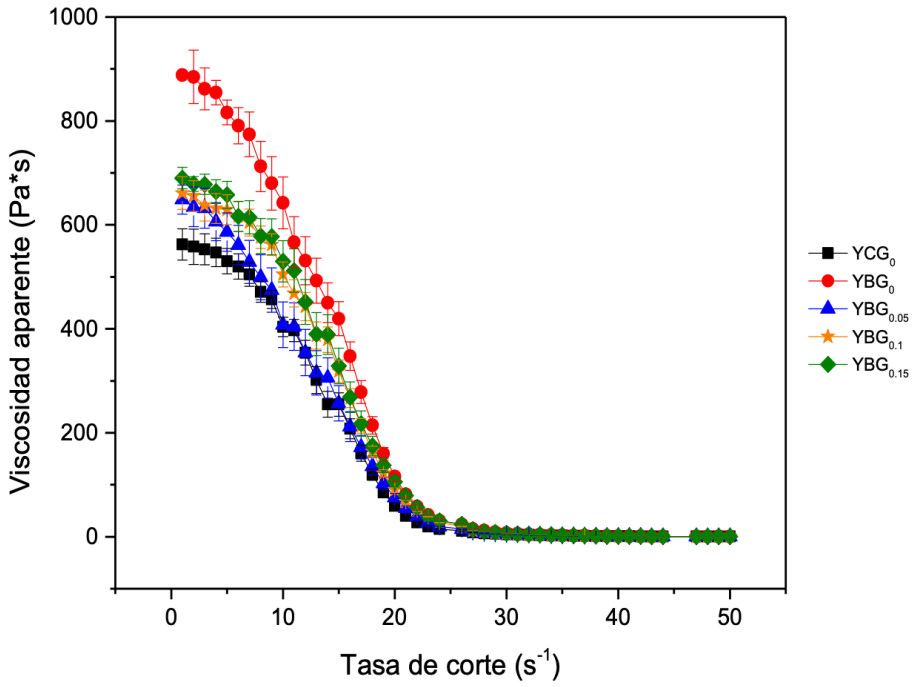


Figura 7. Variación de la viscosidad aparente como función de la tasa de corte. YCG0: yogur completo en grasa (■), YBG0: yogur bajo en grasa (●), YBG0.05 (▲), YBG0.1 (★), YBG0.15(◆); Yogur adicionado con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE.

En la región de bajas tasas de corte (0 - 10 s^{-1}), se evidencian diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el control (YBG_0) el que presenta los valores más elevados de viscosidad aparente, seguido por $YBG_{0.15}$, $YBG_{0.1}$ y $YBG_{0.05}$, mientras que YCG_0 muestra los valores más bajos. Este comportamiento sugiere que la formulación baja en grasa favorece la formación de una red proteica más compacta y estructurada, lo cual incrementa la resistencia al flujo en condiciones cercanas al reposo (Chen et al., 2024).

En los tratamientos adicionados con *Hericium erinaceus* se observó una tendencia dependiente de la concentración, en la que el incremento del porcentaje del hongo se asocia con un aumento de la viscosidad aparente. Este comportamiento se acompaña de un incremento en el tiempo de relajación, lo que indica una mayor resistencia de la estructura frente a la deformación, así como valores más altos de p, que aluden a una menor dependencia de la viscosidad respecto a la tasa de corte (Ilić et al., 2024). La incorporación de *Hericium erinaceus* indica que contribuye a mejorar la estabilidad estructural del sistema. No obstante, este efecto no supera al observado en el tratamiento YBG_0, lo que señala que, aunque la adición del hongo fortalece la red del gel, no reemplaza completamente las interacciones responsables de la estructura en el yogur base bajo en grasa (Zhu et al., 2023). A medida que la tasa de corte aumenta (10–20 s^{-1}), todas las muestras presentan una disminución pronunciada de la viscosidad, lo que refleja la ruptura progresiva de las interacciones débiles que mantienen la estructura del gel y la alineación de las macromoléculas en la dirección del flujo (Akshit et al., 2025).

En la región de altas tasas de corte (> 20 s^{-1}), las curvas tienden a unir, mostrando valores de viscosidad similares entre tratamientos, este fenómeno indica que, bajo condiciones de alto esfuerzo mecánico, la estructura tridimensional del gel tiende a desintegrarse, y el comportamiento del sistema está dominado por la fase continua, por lo tanto, las diferencias estructurales

iniciales entre los tratamientos pierden relevancia en esta región. La similitud en la pendiente de las curvas en la zona de adelgazamiento por cizalla sugiere que todos los tratamientos presentan similitud en su pseudoplasticidad, lo que indica que el mecanismo de flujo es similar independientemente de la formulación (Ba et al., 2025).

4.4.6. **Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)**

La espectroscopía infrarroja (FTIR) es una técnica analítica ampliamente utilizada para la identificación y caracterización de la estructura química de diversos compuestos, mediante la detección de vibraciones moleculares asociadas a grupos funcionales específicos. Este enfoque permite obtener información detallada sobre la composición y las interacciones químicas de una muestra (Berthomieu & Hienerwadel, 2009). En la Figura 8 se presentan los espectros FTIR de los yogures control (YCG_0 y YBG_0) y del tratamiento $YBG_{0.15}$, en los que se observaron bandas de absorción características de la matriz láctea, originadas por proteínas, carbohidratos y lípidos. De acuerdo con la literatura, este tipo de sistemas presenta señales dominadas por contribuciones de agua, lactosa y caseínas, que se reflejan principalmente en regiones amplias propias de grupos hidroxilo y amino, debido a la alta capacidad de interacción intermolecular en matrices gelificadas.

En las tres muestras se observó una banda amplia en el intervalo de 3200 a 3600 cm^{-1}, debido a vibraciones de estiramiento de los enlaces O–H y N–H, indicativa de grupos hidroxilo provenientes de agua, lactosa y ácido láctico, así como de grupos amino de las proteínas. Este comportamiento sugiere una alta interacción intermolecular dentro de la matriz, propia de sistemas altamente hidratados. El tratamiento $YBG_{0.15}$ presentó una mayor intensidad en esta región en comparación con los controles. Este comportamiento podría relacionarse con diferencias en el entorno de los grupos hidroxilo y amino presentes en la matriz. Esta respuesta es consistente con lo reportado en sistemas enriquecidos con polisacáridos, donde la incorporación de β-glucanos incrementa la retención de agua y promueve interacciones con

proteínas, lo que se refleja en un aumento en la intensidad y amplitud de la banda O–H y N–H (Synytsya et al. (2023).

En la región de 3000 a 2800 cm^{-1} se observó una banda alrededor de 2918 cm^{-1}, atribuida a vibraciones de estiramiento asimétrico de enlaces C–H, vinculada a la presencia de cadenas alifáticas de lípidos. La vibración de la banda está relacionada con la contribución de los lípidos en la organización estructural del gel. El tratamiento YCG_0 mostró mayor intensidad respecto a YBG_0, lo cual es consistente por su mayor contenido graso. Por su parte, $YBG_{0.15}$ presentó una intensidad similar a YCG_0, lo que podría relacionarse con diferencias en la composición de la matriz al adicionar *Hericium erinaceus* y en el entorno químico de los enlaces C–H (Wickramasinghe et al., 2023).

En el intervalo de 1700 a 1600 cm^{-1} se presentó una banda cercana a 1624 cm^{-1}, identificada por la vibración de estiramiento del enlace C=O correspondiente a la amida I, indicativa de la estructura secundaria de las proteínas, principalmente de las caseínas. Asimismo, se detectó una banda en el intervalo de 1540 a 1550 cm^{-1}, interpretada como amida II, relacionada con vibraciones de flexión del enlace N–H y estiramiento C–N. Estas bandas son características de las proteínas y se asocian con su participación en la conformación estructural de la matriz. Las variaciones observadas entre tratamientos podrían reflejar diferencias en el entorno químico de los grupos funcionales de las proteínas. En $YBG_{0.15}$, estas diferencias podrían estar relacionadas con la presencia de compuestos de *Hericium erinaceus* en la matriz láctea (Moros et al, 2006; Papadopoulou et al., 2021).

En la región de 1200–1000 cm^{-1} se observaron diferencias más marcadas entre los espectros asociadas a bandas de estiramiento de los enlaces C–O y C–O–C, características de carbohidratos. En particular, esta región se asocia con la presencia de oligosacáridos y polisacáridos, incluidos la lactosa y compuestos de mayor peso molecular. Estas variaciones fueron más evidentes en $YBG_{0.15}$, lo que podría relacionarse con la incorporación de

carbohidratos presentes en la harina de *Hericium erinaceus*, incluidos los β-glucanos. La presencia de estos compuestos podría contribuir a las diferencias espectrales observadas y a las posibles interacciones entre los componentes de la matriz láctea. Aunque los espectros fueron normalizados para facilitar su comparación, las diferencias de intensidad también pueden estar influidas por la preparación de las muestras y el contacto con el cristal. Por ello, los cambios espectrales observados se interpretaron considerando las diferencias en la composición de los tratamientos y las posibles interacciones entre los componentes de la matriz, sin atribuirlos exclusivamente a un mecanismo molecular específico.

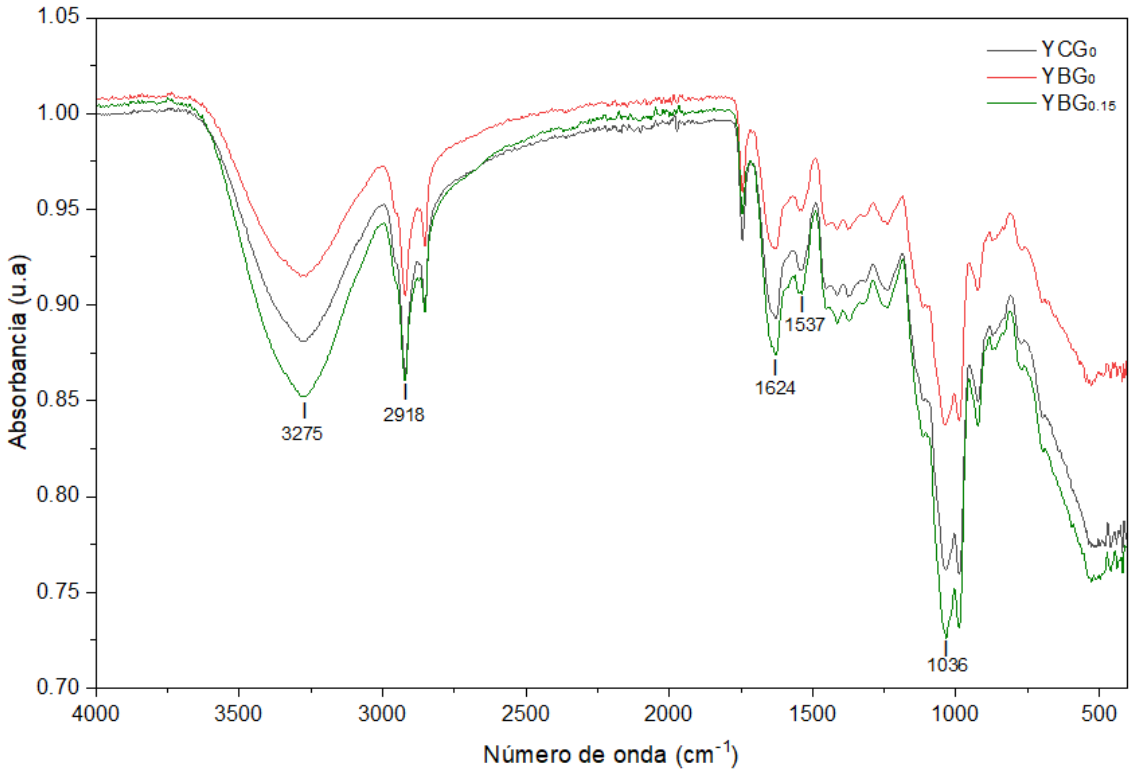


Figura 8. Espectro FTIR de los yogures control (YCG_0 y YBG_0) y adicionado con 0.15 % p/p de HE.

4.4.7. **Microestructura de los yogures**

El análisis microestructural en alimentos se emplea para obtener información cualitativa sobre su estado físico, permitiendo observar la organización espacial de ciertos compuestos identificables y las interacciones que ocurren entre ellos a escalas inferiores a 100 µm (Zhao et al., 2020). Las micrografías obtenidas por barrido de electrones (SEM) en aumentos de 1500 x y 5000 x mostraron diferencias marcadas entre los yogures adicionados y controles, permitiendo analizar tanto la organización general de la red como las interacciones entre caseína y grasa, determinantes de la textura y estabilidad del producto. Las micrografías presentadas muestran la microestructura de las muestras procesadas y no necesariamente la organización original del gel en estado fresco. En la Figura 9 para YCG_0 (A1) se identificó una red proteica tridimensional de carácter compacto y notable homogeneidad. Dicha estructura está constituida por agregados y cadenas de micelas de caseína interconectadas, que presentan zonas de superficie lisa y evidencias de fusión parcial. Al incrementar la resolución (A2), se aprecian aglomeraciones proteicas de alta densidad con una porosidad mínima aparente; la fracción lipídica podría desempeñar una función de relleno estructural, propiciando una microestructura más consistente y uniforme, caracterizada por una reducción en la rugosidad superficial. (Zhao et al., 2020; Gilbert & Turgeon, 2021; Gilbert et al., 2020; Bihola et al., 2026).

En la Figura 9 (B1) se observó una red proteica de YBG_0 la cual es visiblemente menos densa, con una mayor incidencia de espacios, presencia de poros y vacíos estructurales. La reducción de la fracción lipídica limitó el relleno de los poros de la matriz, lo que favoreció una estructura heterogénea en la que las cadenas de caseína no alcanzaron una organización densa y uniforme. En la Figura 9 (B2) se observa una morfología de carácter rugoso y filamentoso, esta morfología es indicativa de una pérdida de cohesión estructural derivada de la reducción en el contenido lipídico, factor que compromete la integridad de la red tridimensional, debido a que el sistema se

torna más vulnerable a la formación de vacíos y discontinuidades respecto a YCG_0 (Kamal-Eldin et al., 2020; Zhao et al., 2020; Gilbert y Turgeon, 2021; Campos et al., 2024). Al adicionar *Hericium erinaceus*, se observaron diferencias microestructurales entre los tratamientos, que podrían relacionarse con la composición de la harina, principalmente el contenido de fibra y proteína, las cuales interactúan con las proteínas presentes en la leche y contribuyen a la estructuración de la red de caseína (Gilbert y Turgeon, 2021).

En comparación con las micrografías de los controles, se observó que la adición de yogur con 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de *Hericium erinaceus* evidenció un efecto dependiente de la concentración sobre la microestructura del sistema. Este comportamiento se atribuye a que, al incrementarse la cantidad de harina, sus polisacáridos se integraron progresivamente en la red de caseínas, actuando como rellenos estructurales y promoviendo interacciones con las proteínas lácteas. Se observó que las muestras adicionadas con el hongo presentaron una morfología aparentemente más organizada, homogénea y compacta, con poros de menor tamaño, con la presencia de poros más pequeños. La micrografía correspondiente a C1 muestra una estructura intermedia en comparación con los controles, caracterizada por una red proteica más continua que YBG_0, aunque sin alcanzar el nivel de organización y porosidad observado en YCG_0. A 5000 x, en C2 se identifican superficies onduladas y parcialmente compactadas, lo que sugiere una reorganización de la red proteica, la cual se asocia a interacciones entre los compuestos bioactivos de *Hericium erinaceus* y las proteínas lácteas (Zhao et al., 2020; Gilbert y Turgeon, 2021; Campos et al., 2024; Jabłońska-Ryś, 2025). En las micrografías D1 y D2 se observa una estructura más organizada y densa en comparación con $YBG_{0.05}$; en D1 se distinguen aglomerados proteicos de mayor tamaño y parcialmente compactos, mientras que en D2 la red presenta una morfología más cerrada, con menor tamaño y número de poros, mayor agregación proteica y una superficie ligeramente rugosa con tendencia a la uniformidad estructural. E1 y E2 muestran una estructura

compacta y continua, siendo la más cerrada entre todas las muestras analizadas, en E1 se observa una homogeneidad, con escasa presencia de cavidades visibles y una apariencia más lisa en comparación con $YBG_{0.05}$ y $YBG_{0.1}$, finalmente en E2 se visualiza una red integrada, con agregados proteicos fusionados y con una mínima porosidad en la cual la superficie presenta ondulaciones suaves, pero sin discontinuidades marcadas, lo que indica cohesión estructural (Zhao et al., 2020; Gilbert et al., 2020; Campos et al., 2024; Jabłońska-Ryś, 2025).

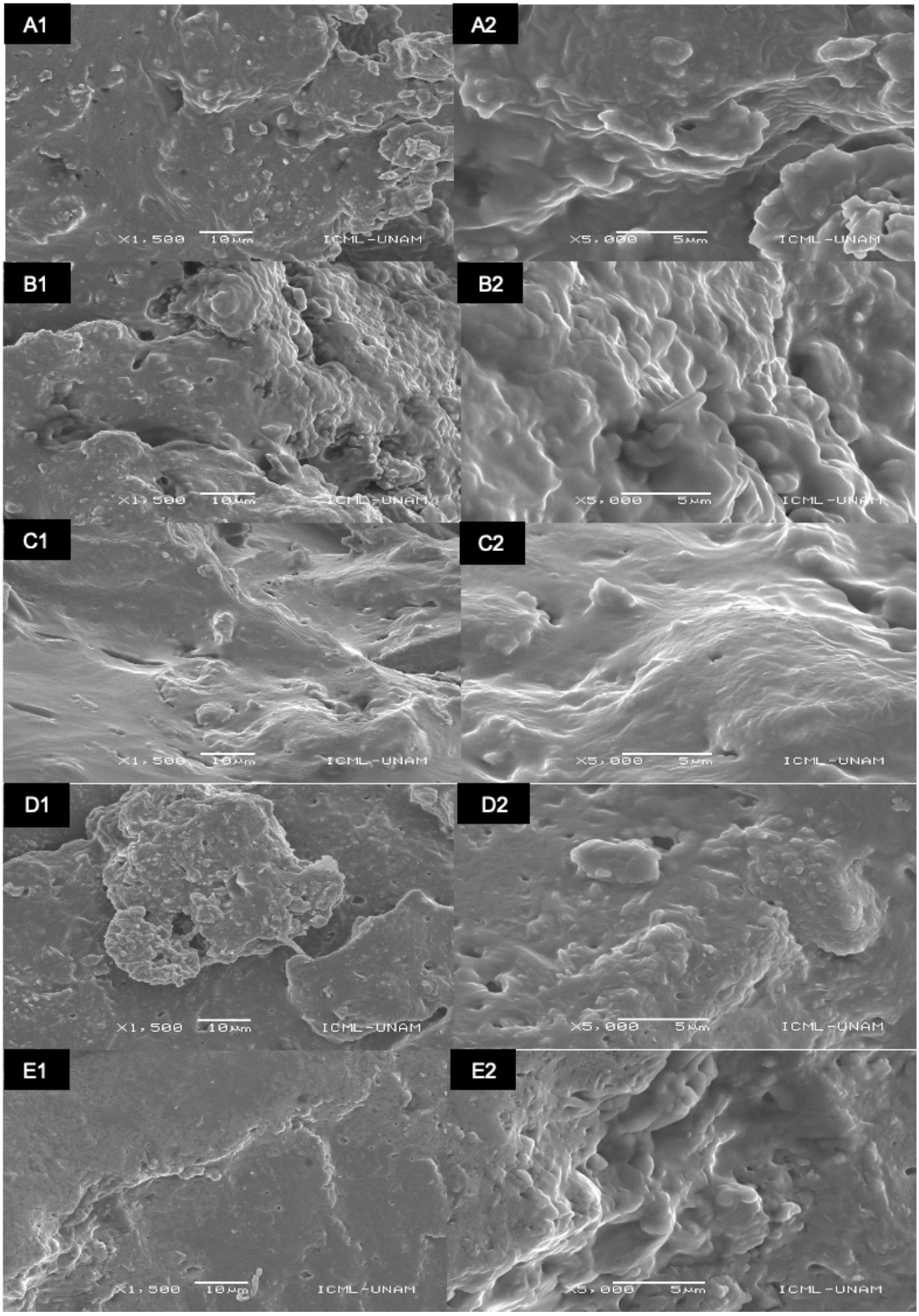


Figura 9. Micrografías de yogures control y adicionados. Yogur completo en grasa (A), Yogur bajo en grasa (B), Yogur con 0.05 % de HE (C), Yogur con 0.1 % de HE (D), Yogur con 0.15 % de HE (E). Amplitud: 1,500x (1) y 5,000x (2).

El tamaño de los poros, el grado de entrecruzamiento de la red y la distribución de las proteínas constituyen los principales parámetros estructurales para describir los geles del yogur y son fundamentales para entender sus propiedades de textura y de percepción sensorial. (Gilbert y Turgeon, 2021; Zhao et al, 2020).

4.4.8. **Evaluación sensorial**

En los últimos años, se han desarrollado enfoques orientados a vincular las propiedades estructurales con las percepciones sensoriales durante el consumo, como la caracterización viscoelástica; sin embargo, estas metodologías aún presentan limitaciones para predecir y cuantificar con precisión dichas propiedades. En este contexto, los análisis sensoriales continúan siendo una de las herramientas más confiables para anticipar el éxito comercial de un producto, ya que permiten evaluar de manera directa la respuesta hedónica del consumidor y considerarla un factor determinante de su aceptación. Esto resulta particularmente relevante en el desarrollo de productos lácteos fermentados como el yogur, cuya aceptación en el mercado depende en gran medida de la elección del consumidor, en la que atributos como el aspecto, el sabor y la sensación en boca desempeñan un papel fundamental. Por ello, la formulación y estructura del yogur deben diseñarse de manera que mejoren, o al menos no comprometan, su aceptabilidad global (Benmeziane et al., 2021; Gilbert y Turgeon, 2021; Patel y Velikov, 2011).

El análisis sensorial para la evaluación de yogures adicionados con *Hericium erinaceus* se realizó con un panel no entrenado, integrado por 80 panelistas de entre 15 y 49 años. Al finalizar el estudio se obtuvo que los atributos de color, acidez, apariencia, granulosidad y sabor residual no tuvieron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) entre los controles y los yogures adicionados; indicando que la incorporación de *Hericium erinaceus* no alteró de manera perceptible estas características sensoriales del yogur, estos parámetros resultan particularmente relevantes, ya que el color y la apariencia constituyen factores determinantes en la primera impresión del

consumidor y como consecuencia en la aceptación inicial del producto (Haq et al., 2019; Jabłońska-Ryś, 2025). Por otra parte, la acidez es un atributo clave en los productos lácteos fermentados, ya que está directamente relacionada con la percepción de frescura y calidad. Asimismo, el atributo de granulosidad se asocia con la percepción en boca y visual, estrechamente vinculada con la microestructura del gel, especialmente con el tamaño y distribución del tipo de ingrediente agregado a la matriz. De manera adicional, el sabor residual está asociado con la duración, intensidad y calidad de las sensaciones que permanecen en el paladar una vez consumido el producto, las cuales pueden ser agradables o en algunos casos, generar notas indeseables como amargor, astringencia o arenosidad, En productos lácteos fermentados como el yogur, el sabor residual puede estar relacionado tanto con compuestos derivados de la fermentación como con los ingredientes añadidos, lo que lo convierte en un indicador clave de la interacción entre la formulación y la percepción sensorial (Gilbert y Turgeon, 2021; Liu et al., 2025). Los resultados de la evaluación sensorial de los yogures adicionados con *Hericium erinaceus* se presentan en el Cuadro 11.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos evaluados en los atributos de sabor, aroma, cremosidad y aceptación global. En los atributos aroma y sabor, si bien YCG_0 presentó las puntuaciones más elevadas, los tratamientos $YBG_{0.05}$ y $YBG_{0.1}$ mostraron valores cercanos, sin evidenciar diferencias marcadas en la percepción sensorial de estos atributos, lo que sugiere que la adición de *Hericium erinaceus* a este nivel permite mantener características sensoriales comparables a las del yogur completo en grasa. Los resultados indican que, aunque la fracción lipídica influye en la percepción sensorial, ciertos niveles de adición de *Hericium erinaceus* pueden contribuir a preservar la aceptabilidad del producto, representando una alternativa tecnológica viable en el desarrollo de productos lácteos reducidos en grasa (Behbahani et al., 2023; Heba et al., 2022).

La cremosidad es un atributo clave en la evaluación sensorial del yogur. De acuerdo con Gilbert y Turgeon (2021), esta percepción sensorial se encuentra estrechamente vinculada a propiedades físicas como la viscosidad y la sinéresis; un incremento en la viscosidad se asocia con una estructura más firme, mientras que una menor sinéresis contribuye a una mayor retención de agua en la matriz del gel. En la presente investigación, los tratamientos $YBG_{0.1}$ y $YBG_{0.05}$ destacaron por presentar valores mayores de aceptación global, similares a la puntuación de YCG_0, evidenciando diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) con respecto a YBG_0 y $YBG_{0.15}$, lo cual podría atribuirse a un efecto favorable de la adición de *Hericium erinaceus* en concentraciones moderadas sobre la estructura del gel, estos niveles moderados promueven una mejor interacción entre los componentes de la matriz, favoreciendo la retención de agua y el incremento de la viscosidad, lo que se traduce en una textura más homogénea y una sensación en boca más cremosa. Por otro lado, en cuanto a la aceptación global, los tratamientos $YBG_{0.1,}$ YCG_0 y $YBG_{0.05}$ presentaron puntuaciones con diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) respecto de $YBG_{0.15}$ y YBG_0. Este comportamiento sugiere que los panelistas mostraron una mayor preferencia por las formulaciones con adición moderada de *Hericium erinaceus*, que además presentaron un perfil sensorial similar al del yogur completo en grasa. Lo anterior indica que, en concentraciones moderadas, la incorporación del hongo no genera diferencias perceptibles marcadas, favoreciendo así la aceptación del producto (Liu et al., 2025; Jabłońska-Ryś, 2025). A partir de estos resultados, la adición de *Hericium erinaceus* puede considerarse una estrategia tecnológica viable en el desarrollo de productos lácteos bajos en grasa, ya que permite compensar parcialmente la pérdida de atributos sensoriales asociada a la disminución del contenido lipídico. Autores como Radzki et al. (2023) han señalado que ciertos compuestos presentes en hongos comestibles, como polisacáridos y fibra, pueden contribuir a mejorar la textura, la sensación en boca y la estabilidad de matrices lácteas alimentarias, lo que favorece la percepción de cremosidad y aceptabilidad en

productos reformulados innovadores. El uso de ingredientes funcionales como *Hericium erinaceus* no solo responde a la necesidad de mantener la calidad sensorial, sino también a la tendencia actual hacia el desarrollo de alimentos con valor agregado nutricional y potenciales beneficios para la salud (Sun et al., 2022).

Cuadro 11. Atributos sensoriales medidos y puntuaciones generales de aceptabilidad de las variaciones de yogur adicionado con *Hericium erinaceus.*

Tratamiento	Color	Aroma	Sabor	Acidez	Apariencia	Cremosidad	Granulosidad	Sabor residual	Aceptación global
YCG_0	4.14 ± 0.83^{A}	4.03 ± 1.07^{A}	3.98 ± 1.07^{A}	3.48 ± 1.14^{A}	3.89 ± 0.99^{A}	3.64 ± 1.03^{B}	3.51 ± 1.20^{A}	3.56 ± 1.05^{A}	3.93 ± 0.87^{A}
YBG_0	4.09 ± 0.84^{A}	3.60 ± 0.98^{B}	3.65 ± 0.93^{B}	3.40 ± 1.12^{A}	3.85 ± 0.92^{A}	3.69 ± 0.92^{A,B}	3.44 ± 1.12^{A}	3.54 ± 0.97^{A}	3.78 ± 0.76^{B}
$YBG_{0.05}$	4.13 ± 0.86^{A}	3.68 ± 1.05^{A,B}	3.95 ± 0.97^{A}	3.61 ± 1.07^{A}	4.01 ± 0.91^{A}	3.91 ± 0.97^{A}	3.56 ± 1.11^{A}	3.64 ± 1.02^{A}	3.91 ± 0.94^{A}
$YBG_{0.1}$	4.05 ± 0.81^{A}	3.66 ± 1.04^{A,B}	3.95 ± 1.11^{A}	3.60 ± 1.22^{A}	3.99 ± 0.92^{A}	3.95 ± 1.06^{A}	3.60 ± 1.11^{A}	3.68 ± 1.03^{A}	3.98 ± 0.91^{A}
$YBG_{0.15}$	4.05 ± 0.83^{A}	3.51 ± 1.07^{B}	3.60 ± 1.07^{B}	3.45 ± 1.14^{A}	3.89 ± 0.99^{A}	3.60 ± 1.03^{B}	3.56 ± 1.20^{A}	3.46 ± 1.05^{A}	3.86 ± 0.87^{A,B}

YCG_0: yogur completo en grasa, YBG_0: yogur bajo en grasa, $YBG_{0.05}$, $YBG_{0.1}$, $YBG_{0.15}$; Yogur adicionado 0.05, 0.1 y 0.15 % p/p de HE, respectivamente. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. Diferentes superíndices dentro de una columna indican que los valores son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

4.5. **Conclusiones**

La incorporación de *Hericium erinaceus* en yogur batido modificó de manera significativa sus propiedades fisicoquímicas, estructurales, funcionales, antioxidantes y sensoriales, evidenciando un efecto dependiente de la concentración. En términos generales, su adición incrementó de forma dependiente a la concentración el contenido, mayormente en $YBG_{0.15}$ de proteína (21.99 ± 0.43) y cenizas (3.90 ± 0.15), favoreció una mayor actividad fermentativa al día 15 de almacenamiento, reflejada en la disminución del pH y el aumento de la acidez titulable en todos los tratamientos, pero en mayor proporción $YBG_{0.15}$ (1.20 ± 0.02 %). Asimismo, se observó una mejora en la capacidad antioxidante del producto y en su estabilidad bajo condiciones gastrointestinales simuladas tanto en la fase gastrica como en la fase intestinal en ambos ensayos ($DPPH^{\bullet+}$ y $ABTS^{\bullet+}$). A nivel estructural, *Hericium erinaceus* contribuyó a la formación de una red de gel más compacta, homogénea y organizada, sobresaliendo el tratamiento $YBG_{0.15}$. En cuanto a las propiedades reológicas y sensoriales, niveles moderados ($YBG_{0.1}$) de incorporación mejoraron la viscosidad, cremosidad y aceptación global del yogur, demostrando que *Hericium erinaceus* es un ingrediente funcional viable para el desarrollo de yogures con valor agregado, siempre que su concentración sea adecuadamente optimizada para equilibrar calidad tecnológica y aceptación sensorial del consumidor.

4.6. **Agradecimientos**

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico otorgado durante los dos años de estudio, al Departamento de Preparatoria Agrícola y al Departamento de Ingeniería Agroindustrial, al Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria por facilitar los materiales requeridos en esta investigación, a la MC. Laura Elena Gómez Lizárraga del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México por su ayuda en el escaneo electrónico para el análisis microscópico de las muestras de yogur.

4.7. **Literatura citada**

Abdelshafy, A. M., Belwal, T., Liang, Z., Wang, L., Li, D., Luo, Z., & Li, L. (2021). A comprehensive review on phenolic compounds from edible mushrooms: Occurrence, biological activity, application and future prospective. Critical Reviews In Food Science And Nutrition, 62(22), 6204-6224. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1898335

Ahmad, I., Hao, M., Li, Y., Zhang, J., Ding, Y., & Lyu, F. (2022). Fortification of yogurt with bioactive functional ingredients and foods and associated challenges: a review. Trends in Food Science and Technology, 129, 558–580. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.11.003

Akshit, F. N. U., Mao, T., Poojary, S., Chelikani, V., & Mohan, M. S. (2025). Evaluating a Novel Hydrocolloid Alternative for Yogurt Production: Rheological, Microstructural, and Sensory Properties. *Foods*, *14*(13), 2252. https://doi.org/10.3390/foods14132252

Alegría, A., Garcia-Llatas, G., & Cilla, A. (2015). Static Digestion Models: General Introduction. En *The Impact of Food Bioactives on Health: in vitro and ex vivo models* (pp. 3-12). https://doi.org/10.1007/978-3-319-16104-4_1

Aleman, R. S., Cedillos, R., Page, R., Olson, D., & Aryana, K. (2023). Physico-chemical, microbiological, and sensory characteristics of yogurt as affected by various ingredients. Journal Of Dairy Science, 106(6), 3868-3883. https://doi.org/10.3168/jds.2022-22622

Arab, M., Yousefi, M., Khanniri, E., Azari, M., Ghasemzadeh-Mohammadi, V., & Mollakhalili-Meybodi, N. (2022). A comprehensive review on yogurt syneresis: effect of processing conditions and added additives. Journal Of Food Science And Technology, 60(6), 1656-1665. https://doi.org/10.1007/s13197-022-05403-6

Atik, A., Atik, İ., Akarca, G., & Denizkara, A. J. (2024). Incorporating Ganoderma lucidum extract and powder with probiotic cultures (Lactobacillus acidophilus and Bifidobacterium animalis subsp. lactis) enhanced the functional, textural, and sensory qualities of yogurt. Journal Of Food Science And Technology, 62(4), 787-798. https://doi.org/10.1007/s13197-024-06068-z

Attar, Aisha. El, Nour. Soda, Morsi. A., Elattar. (2021). The effect of Oyster mushroom (Pleurotus ostreatus) as functional food on yoghurt quality. Jour. 7 (18-19). Vol. 18. https://doi.org/10.7537/marslsj180621.02

Ba, T. L., Dam, M. S., Nguyen, L. L. P., Baranyai, L., & Kaszab, T. (2025). A Review of Processing Techniques and Rheological Properties of Yogurts. *Journal Of Texture Studies*, *56*(1), e70006. https://doi.org/10.1111/jtxs.70006

Bains, A., Chawla, P., Kaur, S., Najda, A., Fogarasi, M., & Fogarasi, S. (2021). Bioactives from Mushroom: Health Attributes and Food Industry Applications. Materials, 14(24), 7640. https://doi.org/10.3390/ma14247640

Basiri, S., Tajbakhsh, S., & Shekarforoush, S. S. (2022). Fortification of stirred yoghurt with mucilage-free flaxseed and its physicochemical, microbial, textural and sensory properties. *International Dairy Journal*, 131(105384), 105384. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105384

Behbahani, B. A., Jooyandeh, H., Vasiee, A., & Zeraatpisheh, F. (2023). Evaluation of anti-yeast metabolites produced by Lactobacillus strains and their potential application as bio-preservatives in traditional yogurt drink. LWT, 188, 115428. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115428

Benmeziane, F., Raigar, R. K., Ayat, N. E., Aoufi, D., Djermoune-Arkoub, L., & Chala, A. (2021). Lentil (Lens Culinaris) flour addition to yogurt: Impact on physicochemical, microbiological and sensory attributes during refrigeration storage and microstructure changes. LWT, 140, 110793. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110793

Bihola, A., Suvera, P., Jana, A. H., Pratiksha, Patwadi, P., Chaudhary, M. B., & Adil, S. (2026). Microstructural characterization of dairy products: structure–function relationships, processing effects, and industrial significance. *Discover Food*, *6*(1). https://doi.org/10.1007/s44187-026-00828-w
Bioscience, 51(102293), 102293. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102293

Bratkič, K., Rodrigues, M. J., Castañeda-Loaiza, V., Pereira, C., Ratão, I., Quintas, C., Majhenič, A. Č., Jeko, J., Cziáky, Z., & Custódio, L. (2025). Physicochemical, nutritional, and antioxidant properties of yogurt fortified with Carpobrotus edulis (L.) N. E. Br. fruit peel extracts. Applied Food Research, 5(1), 100962. https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100962
by-products in yoghurts to create fortified and sustainable foods. *Food Bioscience*, 51(102293), 102293. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102293

Campos, L., Tuma, P., Silva, T., Gomes, D., Pereira, C. D., & Henriques, M. H. F. (2024). Low Fat Yoghurts Produced with Different Protein Levels and Alternative Natural Sweeteners. *Foods*, *13*(2), 250. https://doi.org/10.3390/foods13020250

Carbonell-Capella, J. M., Buniowska, M., Barba, F. J., Esteve, M. J., & Frígola, A. (2014). Analytical Methods for Determining Bioavailability and Bioaccessibility of Bioactive Compounds from Fruits and Vegetables: A Review.

Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety, *13*(2), 155-171. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12049

Chen, B., Cai, Y., Zhao, X., Wang, S., Zhuang, Y., Zhao, Q., Zhao, M., & Van Der Meeren, P. (2024). A novel set-type yogurt with improved rheological and sensory properties by the sole addition of insoluble soybean fiber. Food Bioscience, 58, 103739. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103739

Chen, B., Zhao, X., Cai, Y., Jing, X., Zhao, M., Zhao, Q., & Van der Meeren, P. (2023). Incorporation of insoluble soybean fiber derived from modified okara in curdtype yogurt: structural architecture, rheological properties and moisture stability. Food Hydrocolloids, 137 (108413), 108413. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108413

Dong, R., Liao, W., Xie, J., Chen, Y., Peng, G., Xie, J., Sun, N., Liu, S., Yu, C., & Yu, Q. (2022). Enrichment of yogurt with carrot soluble dietary fiber prepared by three physical modified treatments: Microstructure, rheology and storage stability. Innovative Food Science & Emerging Technologies: IFSET: The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology, 75(102901), 102901. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102901

Du, H., Wang, X., Yang, H., Zhu, F., Cheng, J., Peng, X., Lin, Y., & Liu, X. (2023). Effects of mulberry pomace polysaccharide addition before fermentation on quality characteristics of yogurt. Food Control, 153, 109900. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109900

El-Maradny, Y. A., Abouakkada, A. S., Abbass, A. A. G., Abaza, A. F., & El-Fakharany, E. M. (2025). Prebiotic properties and antioxidant effect of crude extracts and polysaccharides from Agaricus bisporus and Pleurotus ostreatus mushrooms. *Scientific Reports*, *15*(1), 31113. https://doi.org/10.1038/s41598-025-16152-9

El-Said, MM, Haggag, HF, Fakhr El-Din, HM, Gad, A.S. & Farahat, A.M. (2014). Conference Proceedings, 1846, 030006. https://doi.org/10.1063/1.4983433

Ferreira, S. M., & Santos, L. (2023). Incorporation of phenolic extracts from different by-products in yoghurts to create fortified and sustainable foods. *Food*

Friedman, M. (2015). Chemistry, nutrition, and health-promoting properties of *Hericium erinaceus* (Lion's mane) mushroom fruiting bodies and mycelia and their bioactive compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63*(32), 7108–7123. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02914

Ge, F., Chen, Y., Wang, B., Zhou, W., Du, B., & Hou, L. (2025). Bioactive Polysaccharides from *Hericium erinaceus*: Extraction, Structure, Bioactivities,

and Applications. Molecules, 30(8), 1850. https://doi.org/10.3390/molecules30081850

Gilbert, A., & Turgeon, S. L. (2021). Studying stirred yogurt microstructure and its correlation to physical properties: A review. *Food Hydrocolloids*, *121*, 106970. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106970

Gilbert, A., Rioux, L., St-Gelais, D., & Turgeon, S. (2020). Studying stirred yogurt microstructure using optical microscopy: How smoothing temperature and storage time affect microgel size related to syneresis. *Journal Of Dairy Science*, *103*(3), 2139-2152. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16787

Gilbert, A., y Turgeon, SL (2021). Study of the microstructure of whipped yogurt and its correlation with physical properties: a review. *Food Hydrocolloids*, 121 (106970), 106970. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106970

Heba, S., Ali, M., Elbaky, M. A. E. A., & Atwaa, E. (2022). PHYSICOCHEMICAL, RHEOLOGICAL AND SENSORY PROPERTIES OF LOW-FAT YOGHURT SUPPLEMENTED WITH DRIED MUSHROOM POWDER. Zagazig Journal Of Agricultural Research, 49(1), 57-66. https://doi.org/10.21608/zjar.2022.234604 https://doi.org/10.1016/j.aoas.2014.11.007

Ilić, N., Belović, M., Memiši, N., Pestorić, M., Škrobot, D., Pezo, L., Jevtić-Mučibabić, R., Sanz, Y., & Brouzes, J. (2024). Rheological Properties and Sensory Profile of Yoghurt Produced with Novel Combination of Probiotic Cultures. Foods, 13(19), 3021. https://doi.org/10.3390/foods13193021

İnce-Palamutoğlu, M., Palamutoğlu, R., Oruçoğlu, B., Kasnak, C., & Yılmaz, S. (2026). Effect of fermented dairy products on physicochemical and probiotic properties of tarhana in an in vitro gastrointestinal system. Journal Of Food Science And Technology. https://doi.org/10.1007/s13197-026-06593-z

Islam, M. T., Rahman, M. S., Chowdhury, S. R., Chakrovarty, T., Kador, S. M., Islam, M. M., Islam, K. T., Bhuiyan, M. I. U., & Islam, O. K. (2025). Microbial diversity, functional attributes, and nutritional proficiency of yogurts produced in Bangladesh. Discover Food, 5(1). https://doi.org/10.1007/s44187-025-00274-0

Jabłońska-Ryś, E. (2025). Fortifying Yogurt with Edible Mushrooms: Bioactive Compounds and Product Properties. Applied Sciences, 15(24), 12949. https://doi.org/10.3390/app152412949

Kamal-Eldin, A., Alhammadi, A., Gharsallaoui, A., Hamed, F., & Ghnimi, S. (2020). Physicochemical, rheological, and micro-structural properties of yogurts

produced from mixtures of camel and bovine milks. *NFS Journal*, *19*, 26-33. https://doi.org/10.1016/j.nfs.2020.05.001

Kim, S. (2020). Antioxidant Compounds for the Inhibition of Enzymatic Browning by Polyphenol Oxidases in the Fruiting Body Extract of the Edible Mushroom *Hericium erinaceus.* Foods, 9(7), 951. https://doi.org/10.3390/foods9070951

Leal, M. R. S., Albuquerque, P. B. S., Rodrigues, N. E. R., Silva, P. M. D. S., De Oliveira, W. F., Correia, M. T. D. S., Kennedy, J. F., & Coelho, L. C. B. B. (2024). A review on the use of polysaccharides as thickeners in yogurts. Carbohydrate Polymer Technologies And Applications, 8, 100547. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100547

Li, B., Ye, L., Zhao, Y., Liu, Y., Chen, Y., & Zhang, H. (2025). A comprehensive review of probiotic yogurt: nutritional modulation, flavor improvement, health benefits, and advances in processing techniques. Agricultural Products Processing And Storage, 1(1). https://doi.org/10.1007/s44462-025-00023-7

Li, K., Duan, Z., Zhang, J., & Cui, H. (2023). Growth kinetics, metabolomics changes, and antioxidant activity of probiotics in fermented highland barley-based yogurt. Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology], 173(114239), 114239. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114239

Licona-Aguilar, Á. I., Lois-Correa, J. A., Torres-Huerta, A. M., Domínguez-Crespo, M. A., Urdapilleta-Inchaurregui, V., Rodríguez-Salazar, A. E., & Brachetti-Sibaja, S. B. (2023). Production of dietary cookies based on wheat-sugarcane bagasse: Determination of textural, proximal, sensory, physical and microbial parameters. Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology], 184(115061), 115061. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115061

Lin, Y., Xu, Q., Li, X., & Shao, P. (2022). Tremella fuciformis polysaccharides as a fat substitute on the rheological, texture and sensory attributes of low-fat yogurt. Current Research In Food Science, 5, 1061-1070. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.06.007

Liu, X., Sun, X., Wang, T., Sui, F., Ran, X., Teng, K., & Xing, Y. (2025). Dynamic analysis of quality characteristics and flavor development in yogurt fermented with Lentinula edodes polysaccharides. Food Chemistry X, 32, 103284. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.103284

Liuzzi, G. M., Petraglia, T., Latronico, T., Crescenzi, A., & Rossano, R. (2023). Antioxidant Compounds from Edible Mushrooms as Potential Candidates for Treating Age-Related Neurodegenerative Diseases. *Nutrients*, *15*(8), 1913. https://doi.org/10.3390/nu15081913

Luo, X., Tian, M., Cheng, Y., Ji, C., Hu, S., Liu, H., Lu, J., & Ren, J. (2022). Effects of simulated in vitro gastrointestinal digestion on antioxidant activities and

potential bioaccessibility of phenolic compounds from K. coccinea fruits. *Frontiers In Nutrition*, *9*, 1024651. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1024651

Marlapati, L., Basha, R. F. S., Navarre, A., Kinchla, A. J., & Nolden, A. A. (2024). Comparison of Physical and Compositional Attributes between Commercial Plant-Based and Dairy Yogurts. Foods, 13(7), 984. https://doi.org/10.3390/foods13070984

Megrous, S., Al-Dalali, S., & Yang, Z. (2024). Physicochemical and functional properties of yoghurt supplemented with bioactive low-molecular-weight casein hydrolysates. International Dairy Journal, 155, 105956. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.105956

Ng, Z. X., & Rosman, N. F. (2019). In vitro digestion and domestic cooking improved the total antioxidant activity and carbohydrate-digestive enzymes inhibitory potential of selected edible mushrooms. *Journal Of Food Science And Technology*, *56*(2), 865-877. https://doi.org/10.1007/s13197-018-3547-6

Nyanzi, R., Jooste, P. J., & Buys, E. M. (2021). Invited review: Probiotic yogurt quality criteria, regulatory framework, clinical evidence, and analytical aspects. Journal of Dairy Science, 104(1), 1–19. https://doi.org/10.3168/jds.2020-19116

Patel, A., & Velikov, K. (2011). Colloidal delivery systems in foods: A general comparison with oral drug delivery. LWT, 44(9), 1958-1964. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.04.005

Pham, Q., Ho, T. M., Saris, P., Mäkelä-Salmi, N., Amiri, S., Zarei, M., & Yousefvand, A. (2024). Yogurts fortified with postbiotic powders derived from Lactobacillus acidophilus LA5: Physicochemical, rheological, antioxidant, and sensory properties. LWT, 213, 117043. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117043 pomegranate peel extracts. Annals of Agricultural Sciences, 59(2), 207–212.

Qin, S., Ketnawa, S., & Konsue, N. (2025). Sustainable nutrient enhancement of edible mushrooms via boiling and gastrointestinal simulation. *Sustainable Food Technology*, *3*(6), 2052-2065. https://doi.org/10.1039/d5fb00346f

Qiu, Y., Lin, G., Liu, W., Zhang, F., Linhardt, R. J., Wang, X., & Zhang, A. (2023). Bioactive compounds in *Hericium erinaceus* and their biological properties: a review. Food Science And Human Wellness, 13(4), 1825-1844. https://doi.org/10.26599/fshw.2022.9250152

Radzki, W., Skrzypczak, K., Sołowiej, B., Jabłońska-Ryś, E., & Gustaw, W. (2023). Properties of Yogurts Enriched with Crude Polysaccharides Extracted from Pleurotus ostreatus Cultivated Mushroom. Foods, 12(21), 4033. https://doi.org/10.3390/foods12214033

Rashwan, A. K., Osman, A. I., & Chen, W. (2023). Natural nutraceuticals for enhancing yogurt properties: a review. Environmental Chemistry Letters, 21(3), 1907-1931. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01588-0

Rosa Mendoza, Sebastián Guerrero, Byron Herrera-Chávez. (2021). Yogurt Rheology: Effects of unit operations on processing and use of additives. NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA INGENIERÍA y TECNOLOGÍA, 4(1). https://doi.org/10.37135/ns.01.07

Statista. (2026). Yogurt – Worldwide. Statista market forecast. https://n9.cl/1gdr2

Sun, H., Chen, X., Xiang, Y., Hu, Q., & Zhao, L. (2022). Fermentation characteristics and flavor properties of Hericium erinaceus and Tremella fuciformis fermented beverage. Food Bioscience, 50, 102017. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102017

Szućko-Kociuba, I., Trzeciak-Ryczek, A., Kupnicka, P., & Chlubek, D. (2023). Neurotrophic and Neuroprotective Effects of Hericium erinaceus. International Journal Of Molecular Sciences, 24(21), 15960. https://doi.org/10.3390/ijms242115960

Taşdemir, Y., & Gölge, E. (2023). Rheology and sensory properties of microencapsulated propolis-enriched stirred-type yogurt. Italian Journal Of Food Science, 35(3), 155-163. https://doi.org/10.15586/ijfs.v35i3.2187

Thongbai, B., Rapior, S., Hyde, K. D., Wittstein, K., & Stadler, M. (2015). Hericium erinaceus, an amazing medicinal mushroom. Mycological Progress, 14(10). https://doi.org/10.1007/s11557-015-1105-4

Tupamahu, I. P. C., & Budiarso, T. Y. (2017). The effect of oyster mushroom (Pleurotus ostreatus) powder as prebiotic agent on yoghurt quality. AIP various ingredients. Journal of Dairy Science, 106(6), 3868–3883. https://doi.org/10.3168/jds.2022-22622

Tussipov, N., Abdilova, G., Kassenov, A., Kabulov, B., Zhumadilova, G., Bakiyeva, A., Muratzhankyzy, N., Tashybayeva, M., Konarbayeva, G., & Okuskhanova, E. (2026). Study of the effect of fluidized bed drying on changes in the chemical, mineral, and vitamin composition of cottage cheese. *Discover Food*, *6*(1). https://doi.org/10.1007/s44187-026-01102-9

Vénica, C. I., Wolf, I. V., Spotti, M. J., Capra, M. L., Mercanti, D. J., & Perotti, M. C. (2023). Impact of protein-providing milk ingredients on volatile compounds, microstructure, microbiology and physicochemical characteristics of yogurts. Food Bioscience, 53, 102588. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102588

Vital, A. C. P., Goto, P. A., Hanai, L. N., Gomes-Da-Costa, S. M., De Abreu Filho, B. A., Nakamura, C. V., & Matumoto-Pintro, P. T. (2015b). Microbiological, functional and rheological properties of low fat yogurt supplemented with Pleurotus ostreatus aqueous extract. LWT, 64(2), 1028-1035. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.003

Wang, C., Li, B., Wang, B., & Xie, N. (2014). Degradation and antioxidant activities of peptides and zinc–peptide complexes during in vitro gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*, *173*, 733-740. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.066

Wang, H., Zhang, Y., Han, Y., Hou, J., Zuo, Y., Li, Y., & Wu, H. (2025). The Physicochemical, Sensory, and Functional Properties of Yogurt Containing Millet and Milk. Foods, 14(20), 3491. https://doi.org/10.3390/foods14203491

Wang, L., Brennan, M. A., Guan, W., Liu, J., Zhao, H., & Brennan, C. S. (2021). Edible mushrooms dietary fibre and antioxidants: Effects on glycaemic load manipulation and their correlations pre-and post-simulated in vitro digestion. *Food Chemistry*, *351*, 129320. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129320

Yang, F., Wang, H., Feng, G., Zhang, S., Wang, J., & Cui, L. (2021). Rapid Identification of Chemical Constituents in *Hericium erinaceus* Based on LC-MS/MS Metabolomics. Journal Of Food Quality, 2021, 1-10. https://doi.org/10.1155/2021/5560626

Zhang, X., Duan, Y., Xue, J., Chen, S., & Wang, H. (2025). Edible mushroom polysaccharides: Structural characteristics, chemical modification strategies, and structure-activity relationship: A review. International Journal Of Biological Macromolecules, 320(Pt 2), 145888. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145888

Zhao, Y., Zhang, J., Wu, F., Ai, L., Wang, S., Dong, Y., & Xiao, X. (2020). Evaluating the effect of Electromagnetic Stir-Frying Barley Flour on yoghurt quality. *Journal of Food Quality*, 2020, 1-9. https://doi.org/10.1155/2020/3040564

Zhu, H., Chen, Z., Li, G., Yao, X., Hu, Y., & Zhao, W. (2023). *Physicochemical, sensory, and antioxidant characteristics of stirred-type yogurt enriched with* Lentinula edodes *stipe powder*. Food Science & Nutrition, 11(10), 6231–6240. https://doi.org/10.1002/fsn3.3563

Zhuang, H., Dong, H., Zhang, X., & Feng, T. (2023). Antioxidant Activities and Prebiotic Activities of Water-Soluble, Alkali-Soluble Polysaccharides Extracted from the Fruiting Bodies of the Fungus Hericium erinaceus. *Polymers*, *15*(20), 4165. https://doi.org/10.3390/polym15204165

Żulewska, J., Baranowska, M., Bielecka, M. M., Dąbrowska, A. Z., Tarapata, J., Kiełczewska, K., & Łobacz, A. (2025). Effect of Fortification with High-Milk-Protein Preparations on Yogurt Quality. Foods, 14(1), 80. https://doi.org/10.3390/foods14010080