

Universidad Zamorano
Departamento de Agroindustria Alimentaria
Ingeniería en Agroindustria Alimentaria



**Universidad
Zamorano®**

Proyecto Especial de Graduación
**Caracterización nutricional del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado en
distintos sustratos y su aplicación en una salchicha tipo bratwurst**

Estudiantes

Pablo José Rosales Higueros

María Celeste Miranda Munguía

Asesores

Luis F. Maldonado, Ph.D.

Jacob Vásquez, M.Sc.

Honduras, noviembre 2025

Autoridades

KEITH L. ANDREWS

Rector a.i.

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ADELA M. ACOSTA MARCHETTI

Directora Departamento de Agroindustria

JULIO NAVARRO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros	5
Índice de Anexos.....	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Materiales y Métodos	13
Localización Del Estudio.....	13
Etapa I Elaboración de Sustratos, Siembra y Cosecha de Hongos	13
Multiplicación del Micelio.....	13
Obtención de Semilla Primaria	14
Selección y Preparación de los Sustratos.....	15
Cosecha	16
Etapa II Caracterización Nutricional de los Hongos	17
Materiales y Equipos.....	17
Elaboración de las Muestras	18
Diseño Experimental para la Caracterización Nutricional	18
Análisis Estadístico	18
Caracterización Nutricional de los Hongos	19
Etapa III Elaboración y Evaluación Sensorial de Salchicha Tipo Bratwurst con Sustituciones Parciales de Hongo por Carne	24
Elaboración de Pre-emulsión	24
Pesado de Ingredientes No Cárnicos	24
Selección y Pesado de Ingredientes Cárnicos	24
Molienda	25

Mezclado.....	25
Embutido.....	25
Cocción de las Salchichas.....	25
Diseño Experimental.....	25
Descripción del Análisis Sensorial.....	26
Análisis Estadístico.....	26
Resultados y Discusión.....	27
<i>Producción de Spawn de Pleurotus ostreatus</i>	27
Producción del Hongo.....	27
Peso Fresco Cosechado.....	29
Macronutrientes.....	32
Proteína Cruda.....	32
Grasa Cruda.....	34
Carbohidratos.....	36
Fibra Dietética.....	36
Cenizas.....	38
Micronutrientes.....	39
Perfil de Ácidos Grasos.....	41
Prueba de Aceptación.....	43
Prueba de Preferencia.....	46
Referencias.....	49
Anexos.....	55

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Equipo para la elaboración de las muestras secas de las cepas de hongos.....	17
Cuadro 2 Equipo para la caracterización de las muestras de las cepas de hongos.	17
Cuadro 3 Descripción de los tratamientos para la caracterización nutricional de Pleurotus ostreatus.	18
Cuadro 4 Condiciones del cromatógrafo de gases para realizar el análisis de perfil de ácidos grasos.	21
Cuadro 5 Equipo utilizado en la elaboración de la salchicha tipo Bratwurst.....	24
Cuadro 6 Descripción de tratamientos a utilizar en el análisis sensorial.....	26
Cuadro 7 Peso fresco cosechado de Pleurotus ostreatus en los tres sustratos utilizados para su cultivo en 1.5 kg de sustrato húmedo y 30 g de spawn añadido.	29
Cuadro 8 Composición de macronutrientes (%) de harina de Pleurotus ostreatus cultivado en dos sustratos distintos.	32
Cuadro 9 Composición de minerales (mg/100 g) de harina de Pleurotus ostreatus cultivado en dos sustratos distintos.	40
Cuadro 10 Perfil de ácidos grasos en 100 g de harina de Pleurotus ostreatus en dos sustratos distintos.	42
Cuadro 11 Medias de las características sensoriales de la prueba de aceptación de la salchicha tipo bratwurst.	44
Cuadro 12 Análisis de correlación de los atributos de la salchicha tipo bratwurst.	45
Cuadro 13 referencia de la salchicha tipo bratwurst utilizando la prueba de Basker y Kramer.	46

Índice de Figuras

Figura 1 Granos de sorgo colonizados al 100% al día 15.	27
Figura 2 Producción de carpóforos en los dos sustratos evaluados. A: tratamiento tusa de maíz; B: tratamiento tusa más raquis de maíz.	28

Índice de Anexos

Anexo A Multiplicación de micelio con cultivo de referencia Ecosur 1123.	55
Anexo B Inoculación en granos de sorgo para obtención de semilla primaria.....	56
Anexo C Bolsas con sustrato inoculado con micelio de <i>Pleurotus ostreatus</i>	57
Anexo D Hongos cosechados en bandejas limpias y ventiladas.	58
Anexo E Hongos deshidratados.	59
Anexo F Harina de hongo para caracterización nutricional y realización de pre-emulsión (reemplazo proteico).....	60
Anexo G Procesador de alimentos para realización de pre-emulsión (reemplazo proteico) con harina de hongo.	61
Anexo H Pre-emulsión (reemplazo proteico) con harina de hongo.	62
Anexo I Salchichas tipo bratwurst testigo y con sustituciones parciales de la pre-emulsión (reemplazo proteico) con harina de hongo. (A) Testigo 100% carne. (B) Sustitución al 25%. (C) Sustitución al 50%.	63
Anexo J Salchichas tipo Bratwurst con sustituciones parciales de la pre-emulsión con harina de hongo servidas en la evaluación sensorial. (A) Testigo 100% carne. (B) Sustitución al 25%. (C) Sustitución al 50%.....	64
Anexo K Prueba de Basker y Kramer utilizada para conocer valor crítico de diferencia entre suma de categorías.....	65
Anexo L Boleta de evaluación sensorial para salchicha tipo Bratwurst.....	66

Resumen

América Latina enfrenta problemas de inseguridad alimentaria pese a su alto potencial productivo. Los hongos comestibles surgen como una alternativa sostenible por su capacidad de crecer en residuos agrícolas. *Pleurotus ostreatus* es una especie que se distingue por su rápido crecimiento, valor nutritivo y adaptabilidad a residuos agrícolas lignocelulósicos. Este estudio desarrolló integralmente su proceso productivo, desde la obtención del spawn en laboratorio, la evaluación del efecto de sustratos provenientes de residuos del maíz en su composición nutricional, hasta su uso como sustituto parcial de carne en una salchicha tipo bratwurst. Para la caracterización nutricional de los hongos se utilizó un Diseño de Muestras Independientes. Para la evaluación sensorial de las salchichas se empleó un Diseño de Bloques Completos al Azar (BCA). El spawn mostró un desarrollo micelial vigoroso, logrando cosechas entre 30-40 días en sustratos de bráctea y bráctea con raquis, mientras que el raquis por sí solo no permitió fructificación. Los hongos cultivados en tusa presentaron mayor contenido de proteína en base seca (17.14%) y grasa (2.18%), mientras que los de tusa con raquis mostraron más cenizas (9.05%). En cuanto a los minerales, K, Fe y Ca no presentaron diferencias entre tratamientos, mientras que el Na fue mayor en los hongos cultivados en sustrato compuesto de tusa. Las pruebas sensoriales demostraron que las formulaciones con un 25% y 50% de sustitución cárnica mantuvieron una aceptación y preferencia similar al testigo sin sustitución. Se recomienda la evaluación en otros residuos lignocelulósicos, además de un análisis de costos que contemple la sostenibilidad y factibilidad de la producción de *Pleurotus ostreatus*.

Palabras claves: Hongos comestibles, innovación, sostenibilidad, subproductos del maíz, sustratos lignocelulósicos.

Abstract

Latin America faces food insecurity problems despite its high productive potential. Edible mushrooms emerge as a sustainable alternative due to their ability to grow on agricultural residues. *Pleurotus ostreatus* is a species distinguished by its rapid growth, nutritional value, and adaptability to lignocellulosic agricultural residues. This study comprehensively developed its production process, from obtaining spawn in the laboratory, evaluating the effect of maize residue-based substrates on its nutritional composition, to its use as a partial meat substitute in a bratwurst-type sausage. An Independent Samples Design was used for the nutritional characterization of mushrooms. For the sensory evaluation of the sausages, a Completely Randomized Block Design (CRBD) was employed. The spawn showed vigorous mycelial development, achieving harvests within 30–40 days on husk and husk-plus-rachis substrates, while the rachis alone did not allow fructification. Mushrooms grown on husk showed higher protein content on a dry basis (17.14%) and fat (2.18%), whereas those grown on husk plus rachis had higher ash content (9.05%). Regarding minerals, K, Fe, and Ca showed no differences among treatments, while Na was higher in mushrooms cultivated on husk-based substrates. Sensory tests demonstrated that formulations with 25% and 50% meat substitution-maintained acceptance and preference levels similar to the control without substitution. Further evaluation using other lignocellulosic residues is recommended, as well as a cost analysis considering the sustainability and feasibility of *Pleurotus ostreatus* production.

Keywords: Edible mushrooms, innovation, lignocellulosic substrates, maize by-products, sustainability.

Introducción

Latinoamérica enfrenta grandes desafíos para el mejoramiento de sus sistemas agroalimentarios, los cuáles van enfocados hacia una seguridad alimentaria y nutricional sostenible. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO] (FAO, 2021), América Latina y el Caribe representan el 14% de la producción mundial de alimentos y el 45% del comercio agroalimentario internacional neto. Desde este punto de vista, es necesario impulsar la transformación de estos sistemas para alimentar a los 10,000 millones de personas que se estiman para el año 2050.

Sin embargo, toda esta producción está destinada a mercados internacionales, resaltando el potencial para expandir dicho comercio de manera intrarregional (FAO, 2016). Asimismo, esta región enfrenta problemas relacionados al hambre e inseguridad alimentaria. La FAO y el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias [IFPRI] (FAO y IFPRI, 2023), mencionan que el hambre y la inseguridad alimentaria severa en la región aumentó a un ritmo mayor que en el resto del mundo, alcanzando a 56,5 y 93,5 millones de personas respectivamente en 2021.

Para la comprensión de los sistemas alimentarios, Soares et al. (2020) definen que los sistemas alimentarios son estructuras complejas conformadas por una serie de actividades y actores desde la producción agrícola hasta el consumo final de alimentos. Prácticamente, se trata del conjunto de actividades de toda la cadena de valor de los alimentos, donde principalmente se involucran productores, procesadores, distribuidores y consumidores. El mejoramiento de estos sistemas en América Latina supone un avance para el sector agroindustrial, exponen la vitalidad que supone que la industria alimentaria adopte prácticas sostenibles en cuanto a la reformulación de alimentos, reducción del desperdicio y el uso de materiales biodegradables en los procesos.

Una práctica sostenible y pilar para la seguridad alimentaria es la biodiversidad. La región latinoamericana cuenta con los recursos naturales y las capacidades para poder producir de manera sostenible una alta cantidad de alimentos. En zonas rurales se da el uso de muchos ingredientes

silvestres, de los cuáles no existe suficiente información acerca de su perfil nutricional. Esto es una base de los sistemas agroalimentarios, donde se abarca la presencia de distintas especies de plantas, animales y hongos (FAO, 2022). Estos últimos son los menos estudiados debido a la percepción que muchos consumidores tienen hacia estas especies, donde los asocian más con el bosque y no con una cultura gastronómica (Molina Castillo et al., 2022).

La producción controlada de hongos comestibles ha crecido en los últimos años, tanto a nivel de volumen como en valor económico, convirtiéndose de esta manera en un componente crucial de la agroindustria alimentaria. En mercados como Europa y América del Norte, el consumo per cápita ha aumentado significativamente en los últimos doce años, debido a que últimamente se está impulsando tendencias de alimentación saludable, así como una dieta basada en plantas (Del Greco, 2010). En 2021, el consumo de hongos a nivel mundial alcanzó aproximadamente 12.74 millones de toneladas y se proyecta que la producción aumente a 20.48 millones de toneladas para el año 2026, reflejando el creciente interés global por este alimento (Shirur et al., 2021).

Otro punto por destacar es que los hongos desempeñan un papel importante en la economía circular. Esto debido a que son adaptables y muy versátiles, ya que, pueden crecer en sustratos compuestos por residuos agrícolas (Balseca et al., 2021). Esta acción no solo reduce costos, sino que también mitiga la generación de desechos. Cambiando un poco de perspectiva, a nivel comercial los hongos también son valorados como ingredientes funcionales en alimentos, cosméticos y farmacéutica. El hecho de que sean tan dinámicos hace que su estudio y caracterización sea esencial para poder responder a la necesidad que tienen los consumidores, sobre todo en un mercado que se encuentra en constante expansión. Una de las especies más reconocidas a nivel mundial es *Pleurotus ostreatus*.

Pleurotus ostreatus, referido comúnmente como hongo ostra, es el segundo hongo cultivado comercialmente más importante del mundo. Esto es debido a que crece rápidamente bajo un amplio rango de temperatura (10-30 °C), demanda poco control de las condiciones ambientales, coloniza

sustratos en poco tiempo y los sustratos para su producción no necesitan previo compostaje (Lesá et al., 2022). De acuerdo con (Effiong et al., 2023) tiene un alto contenido de carbohidratos, fibra y proteína; además de contar con un buen contenido de vitaminas y minerales, como potasio, hierro, magnesio, vitamina A, vitamina C, vitamina E y vitaminas del complejo B. Por otro lado, su producción se da en sustratos hechos de diversos residuos lignocelulósicos, ya que producen una enzima capaz de degradar la lignina (Quintana Zamora et al., 2024). Por ello, su producción se da con residuos agrícolas de la mazorca de maíz, como lo puede ser la tusa y el raquis.

En el contexto de transición hacia sistemas alimentarios más sostenibles, los hongos comestibles, como *Pleurotus ostreatus*, están ganando protagonismo como una alternativa para mejorar el perfil nutricional de los productos cárnicos (Bach et al., 2017). Uno de los grandes factores a considerar es la huella hídrica del ingrediente. En el estudio de Silva et al. (2023), se calculó la huella hídrica para la producción de *Pleurotus ostreatus*, resultando en 1181 L/kg. Esto representa un dato mucho menor comparado a la huella hídrica producida por carne de res (15,415 L/kg), carne de cerdo (5,988 L/kg) y carne de pollo (4325 L/kg) (Water Footprint Network, 2025). Además, este hongo al contener proteínas con un perfil completo de aminoácidos lo convierte en un ingrediente ideal para el desarrollo de alimentos funcionales. (Moon y Lo, 2014), argumentan que la aplicación de hongos comestibles en productos cárnicos como ingrediente funcional mostraron un resultado favorable en cuanto al parámetro de textura, capacidad de retención de grasas, jugosidad, así como también la aceptación sensorial y funcionalidad.

El objetivo de esta investigación fue realizar la caracterización nutricional de *Pleurotus ostreatus* cultivado en distintos sustratos. A lo largo del proyecto se definió: 1) Desarrollar en condiciones de laboratorio la semilla viable tipo spawn de *Pleurotus ostreatus* 2) Evaluar el efecto del uso de residuos de maíz (tusa y raquis) como sustratos en el perfil nutricional del hongo *Pleurotus ostreatus* 3) Determinar la aceptación sensorial de una salchicha tipo desayuno elaborada con sustitución parcial de carne por *Pleurotus ostreatus*.

Materiales y Métodos

Localización Del Estudio

La producción del micelio y obtención de semilla primaria de *Pleurotus ostreatus* se realizó en el Laboratorio de Microbiología del Departamento de Ambiente y Desarrollo de la Universidad Zamorano, Honduras. La producción del hongo fue dada en el área de zona III de Zamorano. Posteriormente el secado, fase de molienda y caracterización nutricional del hongo fue realizada en el Laboratorio de Análisis de Alimentos Zamorano, LAAZ. La elaboración de la salchicha de desayuno con sustituciones parciales fue realizada en la Planta de Cárnicos de Zamorano y su análisis sensorial llevado a cabo en el Laboratorio de Análisis Sensorial de Zamorano.

Descripción Del Estudio

El estudio consistió en tres etapas. La primera fase se trató de la elaboración de los sustratos junto al desarrollo del micelio, spawn, siembra y cosecha del hongo *Pleurotus ostreatus*. La segunda fase se enfocó en la caracterización nutricional de los hongos obtenidos a partir de los distintos sustratos. La tercera y última fase se basó en la elaboración de una salchicha tipo desayuno con diferentes porcentajes de sustitución de los hongos. Seguidamente estos fueron evaluados sensorialmente determinando cuál fue el producto con mayor aceptación y preferencia.

Etapas I Elaboración de Sustratos, Siembra y Cosecha de Hongos

El proceso de multiplicación del micelio y preparación de la semilla primaria se realizó siguiendo el protocolo descrito por Vásquez (2024).

Multiplicación del Micelio

Se utilizó como medio base Papa Dextrosa Agar (PDA), ampliamente empleado en micología por su capacidad de favorecer el desarrollo de un micelio vigoroso y de textura algodonosa. La formulación consistió en 42 g de medio deshidratado por cada litro de agua destilada, la cual fue previamente filtrada para asegurar la eliminación de partículas en suspensión. La mezcla se llevó a un

matraz Erlenmeyer, se homogenizó utilizando un agitador magnético con calefacción Corning PC-420D a 360 rpm durante 15 minutos y posteriormente se esterilizó en autoclave a 121 °C, aplicando una presión de 15 psi durante 30 minutos, utilizando un equipo Market Forge Sterilmatic®. Esta combinación de temperatura y presión garantizó la destrucción de bacterias, esporas y otros posibles contaminantes que pudieron interferir en el crecimiento micelial.

Seguidamente, al medio de cultivo se incorporó ampicilina a una concentración de 100 mg/L, con el fin de evitar el desarrollo de posibles contaminante. Paralelamente los platos petri, bisturís y pinzas, fueron sometidos a esterilización mediante exposición a radiación ultravioleta durante 30 minutos en la cámara de flujo laminar Labconco Logic+.

Una vez finalizado el proceso de esterilización se procedió a verter 25 mL de PDA a cada plato Petri. Cuando el medio estuvo lo suficientemente sólido, se procedió a realizar la transferencia del cultivo de referencia ECOSUR 1123, previamente mantenido en condiciones controladas. Para ello, se cortó un trozo de aproximadamente 1 cm² de micelio activo utilizando un bisturí estéril, y este se depositó cuidadosamente en el centro de cada plato Petri con PDA.

Las placas inoculadas se sellaron con parafina y se colocaron en una incubadora Thermo Scientific™ Heratherm a una temperatura de 26 °C, donde permanecieron durante un período de 10 días, permitiendo así el desarrollo y la multiplicación del micelio hasta cubrir la mayor parte de la superficie del medio. Este procedimiento aseguró la disponibilidad de material fúngico vigoroso y libre de contaminantes.

Obtención de Semilla Primaria

A partir del micelio desarrollado en medio sólido, se llevó a cabo la preparación de la semilla primaria, también conocida como spawn, término que hace referencia al grano o sustrato estéril colonizado por el micelio, el cual funciona como material de siembra para la expansión del cultivo. Los granos fueron sometidos a una cocción controlada en agua a aproximadamente 95 °C por 20 minutos, con la finalidad de alcanzar un nivel de hidratación adecuado sin deteriorar su estructura física. Una

vez finalizada la cocción, se dejaron escurrir durante 10 minutos, lo que permitió retirar el exceso de agua. Para registrar el nivel de humedad, los granos se pesaron antes y después del proceso de cocción, obteniéndose un valor promedio cercano al 65%, considerado óptimo para el crecimiento del micelio en este tipo de matrices.

Con el propósito de mejorar las condiciones de colonización y evitar la compactación, se incorporó el producto TRIPLE CAL[®], que actúa como corrector de pH y agente antiaglutinante. Se aplicaron 40 g/kg de grano húmedo equivalentes al 4% del peso húmedo. La composición de TRIPLE CAL[®] incluye óxido de calcio (30%), óxido de magnesio (15%) y sulfato (15%). Posteriormente, se verificó el pH con tiras indicadoras (Merck Millipore), observándose valores cercanos a la neutralidad (pH \approx 7), lo cual asegura un entorno favorable para el desarrollo fúngico.

Tanto los granos de sorgo como los recipientes de vidrio con tapas perforadas (para facilitar el intercambio gaseoso) fueron esterilizados en autoclave a 121 °C durante 1 hora. Una vez fríos, se procedió a la inoculación en condiciones asépticas dentro de una cámara de flujo laminar (Labconco Logic+). En cada frasco se colocó un tercio de los granos estériles, sobre los cuales se depositó un fragmento de micelio de aproximadamente un sexto (1/6) de la superficie de una caja Petri, y posteriormente se completó el volumen con los granos restantes, asegurando una adecuada distribución del inóculo.

Los recipientes inoculados se trasladaron a una cámara de incubación Thermo Scientific Heratherm, donde permanecieron durante aproximadamente 15 días a una temperatura constante de 26 °C. Durante este tiempo se realizaron observaciones periódicas para registrar el avance de la colonización, hasta que el micelio cubrió completamente los granos.

Selección y Preparación de los Sustratos

Los sustratos seleccionados fueron aquellos que han demostrado tener una mayor precocidad en cuanto a la producción del hongo ostra (Vásquez, 2024). Se hizo uso del residuo de tusa de maíz (*Zea mays*) y olote, obtenido de una producción convencional dentro de la Universidad Zamorano. Por

una parte, el residuo de tusa fue disgregado a mano, de manera que quedaran tiras aproximadamente de 15 cm de largo y 2 cm de ancho. Mientras que, el olote fue triturado para permitir una mayor área superficial.

Los residuos fueron hidratados en recipientes de plástico durante 30 minutos para alcanzar un porcentaje de humedad alto. Junto a la hidratación, se dio la neutralización de los sustratos, aplicando TRIPLE CAL® en un 2% del peso de dichos sustratos. Una vez hidratados, se colocaron en bolsas para autoclave BIOHAZARD y fueron tratados durante una hora a 121 °C. Los sustratos esterilizados fueron enfriados a temperatura ambiente y colocados en bolsas transparentes de 15 x 25 pulgadas, con un total de 1.5 kg cada una. Durante la colocación de los sustratos en bolsas, se agregó el spawn desarrollado anteriormente de *Pleurotus ostreatus*, este fue del 2% del peso húmedo de los sustratos, lo que equivale a 30 g por repetición. El spawn fue agregado por capas, propiciando el crecimiento micelial en diferentes puntos del sustrato y la bolsa.

Las bolsas inoculadas para cada tratamiento se ubicaron en un cuarto oscuro a temperatura de 25 °C. Se monitoreó el desarrollo del micelio hasta que estuviera 100% colonizado. El tiempo para la colonización total fue de 20 días.

Cosecha

La recolección de los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* se llevó a cabo de manera manual, seleccionando los racimos cuando los sombreros alcanzaron un diámetro aproximado entre 6 y 8 cm, procurando que la superficie aún se mantuviera firme y sin signos de esporulación excesiva. Este criterio de corte se aplicó con el objetivo de garantizar la mejor calidad organoléptica y conservar su valor nutritivo. La separación de los hongos del sustrato se realizó con cuidado, girando suavemente la base del racimo para evitar daños al micelio remanente, ya que éste permite el desarrollo de nuevas oleadas de fructificación. Durante la cosecha se siguieron condiciones de higiene estrictas, utilizando guantes y recipientes desinfectados, lo que contribuyó a mantener la inocuidad del producto.

Posteriormente, los hongos cosechados se colocaron en bandejas limpias y ventiladas para su manipulación y pesaje inmediato, con el fin de reducir la pérdida de humedad y prolongar su vida útil. Cada lote recolectado fue identificado con la fecha de corte y el código correspondiente al tratamiento, lo que permitió llevar un control de la trazabilidad y asegurar la correcta organización de los datos experimentales.

Etapa II Caracterización Nutricional de los Hongos

Materiales y Equipos

Para la caracterización nutricional se utilizó la especie *Pleurotus ostreatus*, cultivado en tres sustratos diferentes: tusa y raquis de maíz en distintas proporciones. El equipo utilizado para la elaboración de las muestras secas se muestra en el Cuadro 1 y para su caracterización en el Cuadro 2.

Cuadro 1

Equipo para la elaboración de las muestras secas de las cepas de hongos.

Equipo	Marca
Balanza de mesa	OHAUS® DEFENDER 3000XtremeW
Deshidratador	ESCALIBUR® DY-110H
Molino	FOSS CT 193 Cyclotec
Licuada	Oster BLST3A-C2T-O13

Cuadro 2

Equipo para la caracterización de las muestras de las cepas de hongos.

Equipo	Marca
Horno de vacío	Fisher scientific 750 F
Destilador para análisis de proteína	FOSS Kjeltex® 8200
Digestor para análisis de proteína	FOSS Tecator® D20
Mufla	SYBRON Thermolyne
Potenciómetro	STARTER 2100
Balanza analítica	OHAUS AX224/E
Cromatógrafo de gases	Agilent Technologies 6890A
Equipo de extracción de lípidos	Foss SOXTEC™ 8000
Espectrofotómetro	Agilent Technologies Cary 8454

Elaboración de las Muestras

Pesado

Los hongos evaluados se pesaron en una balanza de mesa de columna marca OHAUS® DEFENDER 3000XtremeW.

Deshidratado

El deshidratado se realizó a una temperatura de 40 °C durante 10 horas en un deshidratador marca ESCALIBUR® DY-110H, alcanzando un porcentaje de humedad del 10%.

Molido

Una vez deshidratadas las muestras se redujo el tamaño de partícula haciendo uso de un procesador de alimentos de la marca

Almacenamiento

El producto molido se colocó en bolsas de polietileno transparente con cierre fácil y se dejó a temperatura ambiente para realizar la caracterización nutricional.

Diseño Experimental para la Caracterización Nutricional

Para la etapa II referente a la caracterización nutricional del hongo se utilizó un Diseño de Muestras Independientes. Se tuvieron dos tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, dando un total de 6 unidades experimentales. Los tratamientos que se evaluaron se detallan en el Cuadro 3.

Cuadro 3

Descripción de los tratamientos para la caracterización nutricional de Pleurotus ostreatus.

Tratamiento	Descripción
Tratamiento 1	<i>Pleurotus ostreatus</i> en 100% tusa
Tratamiento 2	<i>Pleurotus ostreatus</i> en tusa + raquis

Análisis Estadístico

Los datos fueron analizados en el programa SAS® (Statistical Analysis System, por sus siglas en inglés), Versión 9.4, a través de una prueba T-Student. Se utilizó un nivel de significancia de 95%.

Caracterización Nutricional de los Hongos

Se realizó un análisis de humedad, perfil de ácidos grasos, grasa cruda, proteína cruda, fibra dietética, cenizas y minerales (Ca, Fe, K y Na). El extracto libre de nitrógeno (carbohidratos) fue determinado por diferencia de peso.

Humedad por Horno de Convección con Aire Forzado a 105 °C (AOAC 950.46).

El análisis consistió en introducir crisoles de porcelana dentro de un horno a 105 °C para remover la humedad. Previo a ello tuvo que realizarse un pesado de la muestra, donde se colocaron 3.0000 ± 0.0050 g en cada crisol para posteriormente colocarlos en el horno de convección (Fisher Scientific 750 F) a 105 °C por 18 horas. Luego, se dejaron enfriando las muestras en un desecador durante 20 minutos para después pesar cada crisol con muestra seca en una balanza analítica. Los análisis de humedad se expresan en porcentajes y se calcularon con la Ecuación 1.

$$H(\%) = \frac{(C + MH) - (C + MS)}{(MH)} \quad [1]$$

Donde:

H (%) = Porcentaje de humedad total

C = Peso del crisol

MH = Peso de muestra húmeda

MS = Peso de muestra seca

Perfil de Ácidos Grasos Cis y Trans (Cromatografía de Gases) (ISO 5509, AOAC Ce 2b 11 y AOAC Ce 1j-07).

Se realizó un perfil de ácidos grasos a las cepas de hongos. Este análisis constó de tres etapas, iniciando con la extracción de la grasa cruda y cuantificación de ésta siguiendo el método AOAC 2003.06, seguido de la preparación de los metil ésteres de ácidos grasos siguiendo los métodos ISO 5509, AOCS Ce 2b-11 y Ce 2-66. Se finalizó con la inyección de ácidos grasos en el cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A por el método AOCS Ce 1j-07.

Extracto o Etéreo (Grasa Cruda) (AOAC 2003.06).

Inicialmente se prepararon tazas de extracción con las perlas de vidrio, que fueron secadas durante 30 minutos a 105 °C, y posteriormente pesadas. Utilizando una balanza analítica marca OHAUS AX224/E se pesaron tres muestras de las cepas de hongos de 5 ± 0.0050 g y dos gramos de Celite® 545 dentro de dedales. Dentro de cada dedal preparado se introdujo algodón desgrasado para poder cubrir la muestra. Se posicionaron los dedales y las tazas en el equipo Soxtec® y se agregó 80 mL de hexano en las tres posiciones correspondientes para iniciar con la extracción. Una vez finalizado el ciclo, las tazas fueron retiradas y secadas en un horno de convección (Fisher Scientific 750 F) por 40 min para después ser pesados. Para calcular la cantidad de grasa en la muestra se usó la Ecuación 2.

$$G(\%) = \frac{(PT + PG) - PT}{PM} * 100 \quad [2]$$

Donde: G (%) =Porcentaje total de grasa.

PT= Peso de taza.

PG= Peso de grasa.

PM= Peso de la muestra.

Preparación de Metil Ésteres de Ácidos Grasos.

Se siguieron los procedimientos según los métodos ISO 5509, AOCS Ce 2b-11 y Ce 2-66. La grasa extraída se colocó en una taza a baño maría hasta que esta se vuelva líquida, posteriormente se adicionó 2 mL de isooctano a la taza, homogenizando con movimientos circulares. Para extraer el contenido hacia el tubo de ensayo se utilizó una pipeta, para después colocar 0.5 mL de KOH metanólico al 2 M, agitándolo por 8 minutos en un vortex, seguido de esto se dejó reposando la solución durante 10 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, se extrajo 1 mL de la fase superior del tubo, la cual se colocó en otro tubo de ensayo. Luego se adicionó 4 mL de isooctano y 1 g de Sulfato de Sodio, repitiendo las condiciones de tiempo de agitación y reposo anteriores. Finalmente se tomó una alícuota de 1.5 mL de la fase superior y se trasladó a un vial.

Inyección de Ácidos Grasos.

Se siguieron las normas según el método oficial AOCS Ce 1j07. Se inyectó 1 µL del vial en el cromatógrafo de gases (Cuadro 4) de la marca Agilent Technologies modelo 6890 system, para poder identificar los ácidos grasos según su tiempo de elusión y el área bajo la curva, esta última representa la concentración de cada ácido graso.

Cuadro 4

Condiciones del cromatógrafo de gases para realizar el análisis de perfil de ácidos grasos.

Partes	Parámetros
Gases	Hidrógeno
Columna	SP - 2560 250°C 100 m x 250 µm x 0.25 µm
Horno	Temperatura inicial 180 °C, tiempo 32 min Tiempo final 250 °C, tiempo 31 min Velocidad de calentamiento 20 °C/min
Detector (FID)	Temperatura 325 °C Presión de aire 450 mL/min Presión de hidrógeno 40.0 mL/min
Inyector (Split)	Gas make-up (Nitrógeno): 46 mL/min Temperatura 235 °C Split radio 1:100 Velocidad lineal 39 cm/seg
Duración del método	65 min
Volumen de inyección	1.0 µL

Proteína Cruda (AOAC 2001.11).

Se determinó el contenido de nitrógeno orgánico presente en la estructura de las proteínas. El método se divide en cuatro partes: digestión, neutralización, destilación y titulación. Para la primera parte se colocó por repeticiones 1 ± 0.0050 g de muestra envuelta en papel encerado de bajo contenido de nitrógeno en tubos de digestión de 250 mL. En dichos tubos se colocaron dos tabletas catalizadoras (Kjeltabs®) y 10 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 95-98%. Estos tubos se pasaron al digestor FOSS Tecator 20® a 420 °C para digerir la muestra durante 1 hora. Luego, se realizó el proceso de destilación de nitrógeno orgánico de la muestra, utilizando 50 mL de solución de NaOH al 40% y 30

mL de solución receptora (H₃BO₃) al 4%; dicha solución contenía rojo de metilo y verde bromocresol como indicadores. Finalmente, se hizo la titulación usando HCl al 0.1 N hasta obtener un color rosa pálido. El cálculo de proteína fue siguiendo la Ecuación 3.

$$\% \text{Proteína} = \frac{\text{NHCl} \times (V_s - V_b) \times 14.01 \text{ g/mol}}{M \times 10} \times 6.25 \quad [3]$$

Donde:

N = Normalidad del ácido clorhídrico estandarizado

V_s = Volumen de ácido gastado en la titulación de la muestra

V_b = Volumen de ácido gastado en la titulación del blanco

M = Peso de la muestra

Fibra Dietética (AOAC 991.43).

La muestra fue colocada en un vaso de precipitación Berzelius de 600 mL, se pesaron 1 ± 0.0050 g de muestra. Luego, se agregaron 50 mL de tampón fosfato pH 6 a cada vaso de precipitación y se mezclaron. Se añadieron 100 µL de solución α-amilasa termoestable. Después, cada vaso de precipitación fue cubierto con papel aluminio e incubado en baño María a 95 °C por 15 minutos y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente, se añadieron 10 mL de solución de NaOH 0.275 M y se ajustó el pH a 7.5 ± 0.2, se agregaron luego 100 µL de solución de proteasa 50 mg/mL al vaso de precipitación. Seguido a ello, nuevamente el vaso de precipitación fue cubierto con papel aluminio e incubado baño María por 60 °C durante 30 minutos con agitación continua. Se añadieron 10 mL de solución de HCl 0.325 M ajustando el pH en un rango de 4.0-4.6. Se añaden 100 µL de solución de amiloglucosidasa y se cubren los vasos nuevamente por 30 minutos en baño María a 60 °C.

Continuando con el proceso, se agregaron 280 mL de etanol al 95% precalentado a 60 °C. Las muestras fueron retiradas del baño María y se dejaron precipitar por una hora a temperatura ambiente. Se pesaron crisoles previamente incinerados a 550 °C por una hora, luego se agregaron 0.5 g de celite. El contenido de cada vaso de precipitación fue vertido en el crisol y filtrado al vacío. Se hizo un lavado con etanol al 78% con una espátula para retirar material de las paredes del vaso de

precipitación. El crisol con los residuos se secó por 8 horas en un horno de convección a 105 °C. Finalmente, se pesó el crisol y se determinó el porcentaje de fibra dietética.

Cenizas (AOAC 923.03).

Se colocaron muestras de 3 ± 0.0050 g en crisoles de porcelana vacíos, los cuales fueron previamente secados y pesados. Se procedió a realizar un pre-secado utilizando un horno de convección marca Fisher Scientific 750 F a una temperatura de 105 °C durante 18 horas. Seguido de esto, la muestra se colocó en un incinerador (SYBRON Thermolyne) a 550 °C por 6 horas. Una vez transcurrido este tiempo, se retiraron las muestras del incinerador, las cuales se dejaron en un desecador durante 20 minutos para poder registrar el peso final.

Para el cálculo de porcentaje cenizas totales se utilizó la Ecuación 4:

$$CZ(\%) = \frac{(CZ)}{(MH)} * 100 \quad [4]$$

Donde:

CZ (%) = Porcentaje de cenizas totales.

CZ= Peso de cenizas.

MH= Peso de materia húmeda.

Minerales Ca, Fe, K y Na (Espectrofotometría de Absorción Atómica con Llama, AOAC 985.35)

Luego de haber extraído las cenizas de las muestras, se agregaron 5 mL de ácido nítrico 1 M a un crisol seco (esto para cada muestra a evaluar) y se colocaron en baño maría durante 2 a 3 minutos. Después, se añadió dicha solución a un matraz volumétrico de 50 mL, a la cual se le realizaron lavados con dos porciones de 5 mL de HNO₃ 1 M y se aforó a volumen. Para finalizar, se realizó el análisis de la solución utilizando el espectrofotómetro de absorción atómica.

Etapa III Elaboración y Evaluación Sensorial de Salchicha Tipo Bratwurst con Sustituciones Parciales de Hongo por Carne

Los equipos utilizados para la elaboración de la salchicha tipo Bratwurst con sustitución parcial de hongo *Pleurotus ostreatus* se describen en el Cuadro 5.

Cuadro 5

Equipo utilizado en la elaboración de la salchicha tipo Bratwurst.

Equipo	Marca
Balanza	OHAUS® R31P30 RANGER
Moledora de carne industrial	ProCut®
Mezcladora	KitchenAid®

Elaboración de Pre-emulsión

Se elaboró una pre-emulsión (reemplazo proteico) en la Planta de Innovación de Alimentos de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, utilizando una proporción de 1 g de harina de hongo, 2 g de aceite de canola y 7 g de agua, además de goma konjac como gelificante. La mezcla fue procesada en un procesador de alimentos marca Hobart FP41-1 hasta obtener una emulsión homogénea.

Pesado de Ingredientes No Cárnicos

El pesaje de los ingredientes no cárnicos se realizó utilizando una balanza digital OHAUS® R31P30 RANGER.

Selección y Pesado de Ingredientes Cárnicos

Para la formulación de la salchicha tipo Bratwurst se emplearon dos tipos de carne: cerdo con contenido de grasa del 40% (C2) y carne de res magra (R-X1). Ambas materias primas fueron proporcionadas por la Planta de Cárnicos de Zamorano, posteriormente fueron pesadas de acuerdo con la formulación establecida para cada tratamiento.

Molienda

Ambas carnes fueron trituradas por separado en una moledora industrial ProCut® con orificios de 53 mm y puestas en bolsas individuales.

Mezclado

Los ingredientes cárnicos molidos se combinaron con los ingredientes no cárnicos, este paso se hizo de manera manual. Este proceso permitió integrar los componentes de manera uniforme, asegurando una emulsión y textura homogénea. Se procedió a preparar mezcla para cada tratamiento y se ubicaron en bolsas individuales.

Embutido

La mezcla se pasó a una embutidora manual, donde en la boquilla se colocaron tripas naturales de res y se introdujo la mezcla cuidando en todo momento que no se generaran burbujas de aire dentro de la tripa. Posteriormente, las salchichas fueron amarradas manualmente con hilo, formando unidades individuales de tamaño estandarizado.

Cocción de las Salchichas

Las salchichas se identificaron de acuerdo con su tratamiento y se sometieron a un proceso de cocción en horno industrial a una temperatura de 120 °C, hasta alcanzar una temperatura interna de 72 °C. Este proceso garantizó la inocuidad microbiológica del producto.

Diseño Experimental

Se empleó un Diseño de Bloques Completos al Azar (BCA) contando con 2 tratamientos, un testigo y tres repeticiones para un total de 9 unidades experimentales para el análisis sensorial de la salchicha. En el Cuadro 6 se observa la descripción de cada uno de los tratamientos.

Cuadro 6

Descripción de tratamientos a utilizar en el análisis sensorial.

Ingrediente	Testigo	Trt1 (25%)	Trt 2 (50%)
Carne de res R-X1 (magra)	21.00%	15.75%	10.50%
Carne de cerdo C2 (40 % grasa)	61.00%	61.00%	61.00%
Pre-emulsión (reemplazo proteico)	0.00%	5.25%	10.50%
Hielo / Agua	14.00%	14.00%	14.00%
Fosfatos	1.00%	1.00%	1.00%
Cebolla en polvo	0.25%	0.25%	0.25%
Humo en polvo	0.17%	0.17%	0.17%
Nuez moscada	0.25%	0.25%	0.25%
Sal	2.10%	2.10%	2.10%
Eritorbato de sodio	0.04%	0.04%	0.04%
Sal nitritada (6.5 %)	0.19%	0.19%	0.19%
TOTAL	100.00%	100.00%	100.00%

Descripción del Análisis Sensorial

Se realizó una evaluación sensorial afectiva con una prueba de aceptación para determinar el nivel de agrado o desagradado del producto. Se hizo uso de 100 panelistas no entrenados utilizando una escala hedónica de 9 puntos. Los atributos evaluados fueron: color, olor, sabor, textura, jugosidad y aceptación general. Asimismo, se hizo una prueba de preferencia por ordenamiento con una escala de 1 a 3, donde 1 es el más preferido y 3 el menos preferido.

Análisis Estadístico

Los datos fueron analizados en el programa SAS® (Statistical Analysis System), por sus siglas en inglés), Versión 9.4, a través de un análisis de varianza (ANDEVA) para poder determinar si existieron diferencias significativas entre tratamientos. Luego, se aplicó una prueba Duncan para la separación de medias, determinando el tratamiento que obtuvo los mejores resultados en la evaluación sensorial trabajando con un nivel de significancia de 5%. Para el análisis de la prueba de preferencia se utilizó una prueba no paramétrica de Basker y Kramer.

Resultados y Discusión

*Producción de Spawn de *Pleurotus ostreatus**

Durante el proceso de producción se observó una colonización vigorosa y uniforme del micelio sobre los granos de sorgo utilizados como semilla primaria. A los 15 días de incubación, los frascos presentaron una colonización completa, evidenciando que la hidratación (65%) fue adecuada para favorecer el desarrollo micelial como se evidencia en la Figura 1. Esta condición permitió mantener un equilibrio óptimo de humedad y oxígeno, factores esenciales para el crecimiento del micelio y la posterior formación de cuerpos fructíferos.

Figura 1

Granos de sorgo colonizados al 100% al día 15.



Producción del Hongo

Los carpóforos obtenidos mostraron un crecimiento vigoroso y sombreros de buen tamaño, lo que refleja la fuerza y vitalidad del hongo, así como una correcta preparación del sustrato, tal como se muestran en la Figura 2.

Los primeros cuerpos fructíferos se vieron en las bolsas que tenían el tratamiento con tusa de maíz, lo que se explica por su estructura más porosa y su composición rica en carbohidratos fácilmente degradables, que favorecen la aireación y el acceso del micelio a los nutrientes. Este comportamiento concuerda con lo mencionado por Rakib et al. (2020), quienes señalan que los sustratos con mayor porosidad y contenido energético promueven una fructificación más rápida y eficiente.

Por otro lado, las bolsas con tusa + raquis de maíz presentaron un desarrollo más lento, probablemente debido a su alta lignificación y baja disponibilidad de nitrógeno, lo que dificulta la degradación del sustrato y retrasa la formación de primordios. Aun así, el raquis no impidió la fructificación, lo que sugiere que con el tiempo la mezcla permitió equilibrar la estructura física y mejorar la aireación, favoreciendo la emergencia de los carpóforos.

Figura 2

Producción de carpóforos en los dos sustratos evaluados. A: tratamiento tusa de maíz; B: tratamiento tusa más raquis de maíz.



Peso Fresco Cosechado

El peso fresco cosechado del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado en tres sustratos diferentes se evidencia en el Cuadro 7. El análisis estadístico se realizó tomando en cuenta únicamente los sustratos en donde el hongo logró fructificar. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas ($P \geq 0.05$) entre los tratamientos de tusa y la combinación de tusa y raquis. Asimismo, el sustrato compuesto únicamente por raquis no logró la fructificación de los hongos. Los resultados son presentados en gramos por 1.5 kg de sustrato húmedo, además de 30 g de spawn por bolsa de sustrato.

Cuadro 7

Peso fresco cosechado de Pleurotus ostreatus en los tres sustratos utilizados para su cultivo en 1.5 kg de sustrato húmedo y 30 g de spawn añadido.

Tratamientos	Peso (g)	Humedad (%)
Tusa	135.00 ± 5.00	91.41 ± 1.38
Tusa + Raquis	138.30 ± 27.53	91.48 ± 1.53
Raquis	0.00	N/A
Pr > t	0.9006	0.9317
CV (%)	13.49	1.59

Nota. Valor $P \leq 0.05$ indica diferencias estadísticas entre tratamientos. CV: Coeficiente de variación. N/A: No aplica. Peso obtenido en 1.5 kg de sustrato húmedo.

La ausencia de fructificación en el sustrato compuesto únicamente por raquis de maíz puede explicarse por las características físicas y químicas de esta materia prima. El raquis es la parte leñosa y más lignificada de la mazorca de maíz, de manera que presenta una estructura densa y con escasa porosidad. Rakib et al. (2020) exponen que para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* es necesario un material más poroso, ya que genera menor compactación, mejorando la ventilación y el acceso del micelio para la colonización del sustrato. Por ello, la estructura del raquis dificulta el intercambio gaseoso dentro del sustrato, pudiendo generar acumulación de dióxido de carbono, lo que inhibe la formación de primordios.

Del mismo modo, otro factor a considerar es la relación carbono-nitrógeno (C/N) y el contenido de nitrógeno asimilable que contienen los sustratos. Por un lado, la relación C/N no debe ser muy alta, ya que esto significaría un exceso de carbono junto a una deficiencia de nitrógeno. Esto conlleva a un crecimiento más lento y puede provocar una nula producción de cuerpos fructíferos. Además, el contenido de nitrógeno es vital para la síntesis de enzimas lignocelulolíticas, como laccasas, peroxidasas y celulasas, que degradan el sustrato (Da Luz et al., 2012). Lo anterior es congruente con los resultados presentados por Álvarez-Solís et al. (2016), donde realizaron la extracción de nitrógeno en subproductos del cultivo de maíz, encontrando una menor concentración en el raquis (1.5 kg N/ha) comparado al rastrojo, raíz y tusa. Asimismo, Roblero-Mejía et al. (2021) caracterizaron diversos sustratos para la producción de *Pleurotus ostreatus*, encontrando así el menor contenido de nitrógeno en el sustrato compuesto 100% por raquis (0.41%), además de una relación C/N muy alta (131:41).

En cuanto a la tusa, su incorporación muestra un buen desempeño para la fructificación de *Pleurotus ostreatus*. Estudios han evaluado el uso de tusa con diferentes porcentajes en combinación con aserrín, encontrando que a medida aumentaba la proporción de tusa también lo hacía la producción de cuerpos fructíferos, peso fresco, peso seco y eficiencia biológica (Rakib et al., 2020). Para una mejor comprensión del comportamiento observado es necesario caracterizar los sustratos utilizados, determinando la relación C/N y el porcentaje de nitrógeno presente en los materiales utilizados.

Asimismo, el contenido de humedad es un parámetro fundamental en la evaluación de la calidad de *Pleurotus ostreatus*, ya que un alto porcentaje de agua puede favorecer el deterioro microbiano, la pérdida de firmeza y la reducción de la vida útil del producto. Al mismo tiempo, un nivel adecuado de humedad refleja un crecimiento micelial sano y garantiza la conservación de las cualidades organolépticas, como la textura y la apariencia, que determinan la aceptación por parte del consumidor. Según Nketia et al. (2020), los hongos con más de 90 % de humedad son más

propensos al deterioro, mientras que un control adecuado del agua en el tejido mejora la estabilidad poscosecha.

En este estudio, el contenido de humedad del cuerpo fructífero de *P. ostreatus* cultivado sobre tusa fue de 91.41%, y en el tratamiento con tusa + raquis de maíz alcanzó 91.48%. La ausencia de diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) indica que la composición del sustrato no influyó de manera notable en la capacidad del hongo para retener agua. Esto demuestra una alta estabilidad fisiológica en los carpóforos respecto a su equilibrio hídrico durante la fructificación. Resultados similares fueron reportados por Abou Fayssal et al. (2023), quien encontró valores de humedad cercanos a 91% en *P. ostreatus* cultivado sobre mezclas lignocelulósicas, sin diferencias significativas entre los tipos de sustrato utilizados.

Asimismo, Khan et al. (2008) determinó que los hongos comestibles presentan una humedad entre 85% y 90% en estado fresco, rango en el cual se ubican cerca de los valores obtenidos en el presente estudio. Esto confirma que los resultados se encuentran dentro del intervalo fisiológico esperado para la especie. La elevada humedad registrada puede explicarse por la estructura del micelio y de los tejidos del hongo, los cuales poseen una matriz porosa que permite la retención tanto intracelular como extracelular de agua.

En cuanto a los sustratos, la tusa de maíz presenta una estructura fibrosa y más abierta, lo que facilita la retención y disponibilidad de humedad para el micelio. En cambio, el raquis es una parte más leñosa y lignificada de la mazorca, con una textura compacta y de menor porosidad. Esto limita su capacidad para almacenar agua libre, pero favorece la estabilidad estructural del sustrato. La combinación de ambos materiales pudo equilibrar las propiedades físicas, proporcionando suficiente humedad sin causar saturación.

De acuerdo con Ab Rhaman et al. (2021), la porosidad del sustrato y su contenido de agua influyen directamente en la hidratación del micelio y en la textura del hongo, ya que un material con buena aireación facilita el transporte de oxígeno y agua, manteniendo tejidos firmes y saludables. Silva

et al., (2024) menciona que la humedad del sustrato ideal para el cultivo de *Pleurotus* debe situarse entre 60% y 70%, ya que niveles superiores pueden reducir la oxigenación, mientras que niveles bajos dificultan el desarrollo micelial. En el presente estudio, las condiciones de cultivo parecen haber sido adecuadas, pues los carpóforos mantuvieron un contenido hídrico estable y dentro del rango óptimo reportado.

Macronutrientes

El Cuadro 8 presenta los resultados obtenidos en cuanto a la composición de macronutrientes del hongo *Pleurotus ostreatus* en dos sustratos diferentes; estos resultados se presentan en base seca. Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para cada uno de los macronutrientes, a excepción de la fibra dietética. Los hongos cultivados en tusa obtuvieron porcentajes mayores en proteína (17.14% en base seca) y grasa (2.18% en base seca). En contraste, aquellos cultivados en el sustrato con una combinación de tusa y raquis consiguieron un mayor porcentaje en carbohidratos y cenizas.

Cuadro 8

Composición de macronutrientes (%) de harina de Pleurotus ostreatus cultivado en dos sustratos distintos.

Tratamientos	Macronutrientes (%) \pm DE				
	Proteína	Grasa	CHO Digeribles	Fibra dietética	Cenizas
Tusa	17.14 \pm 1.00	2.18 \pm 0.36	43.00 \pm 4.11	31.36 \pm 2.55	6.32 \pm 1.29
Tusa + Raquis	14.30 \pm 1.02	1.29 \pm 0.13	43.28 \pm 4.65	31.83 \pm 5.08	9.05 \pm 1.16
Pr > t	0.0264	0.0160	0.9424	0.8936	0.0032
CV (%)	5.40	20.05	6.50	9.84	15.98

Nota. Pr > |t|: Probabilidad agrupada (varianzas iguales), ≤ 0.05 indica diferencias estadísticas entre tratamientos. CV: Coeficiente de variación. CHO: Carbohidratos.

Proteína Cruda

El análisis proximal evidenció diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$) en el contenido de proteína de *Pleurotus ostreatus* cultivado en los diferentes sustratos evaluados. El hongo desarrollado sobre tusa presentó un valor promedio de 17.14% de proteína, mientras que aquel cultivado en la mezcla tusa con raquis de maíz alcanzó 14.30%. Esta diferencia sugiere que la

composición del sustrato ejerce una influencia directa sobre la capacidad del micelio para sintetizar y acumular compuestos nitrogenados.

La proteína es un macronutriente esencial cuya función principal es suministrar aminoácidos, componentes fundamentales que aportan nitrógeno y estructuras carbonadas necesarias para los procesos metabólicos. Estos aminoácidos participan activamente en el metabolismo celular, interviniendo en el crecimiento, reparación de tejidos y síntesis de enzimas, hormonas, anticuerpos y metabolitos secundarios, lo que resalta su papel vital en el mantenimiento de las funciones fisiológicas del organismo (Espinosa y Gonzalez, 2023).

Los valores obtenidos en este estudio se encuentran dentro del rango reportado por diversos autores para *Pleurotus ostreatus* cultivado en residuos agroindustriales. Elkanah et al. (2022) indicaron que el contenido de proteína en *P. ostreatus* varía entre 10.09% y 19.14%, dependiendo del tipo de sustrato utilizado y de las condiciones de cultivo. De manera similar, Effiong et al. (2023) reportaron valores que oscilaron entre 16.07% y 25.15% en muestras secas de *Pleurotus* cultivadas sobre diferentes residuos lignocelulósicos, lo que demuestra que la composición química del sustrato tiene una influencia directa en la acumulación de proteína. Por su parte, Sultana et al. (2024) encontraron un rango aún más amplio, de 9.3% a 34.7%, al evaluar distintas especies del género *Pleurotus* en condiciones controladas, confirmando la variabilidad del contenido proteico según la disponibilidad de nutrientes y la relación C/N del sustrato.

En hongos comestibles, su contenido depende de múltiples factores como el tipo de sustrato, la disponibilidad de nitrógeno, la relación C/N y las condiciones de cultivo (Bandura et al., 2021). El mayor contenido proteico en el tratamiento con tusa como sustrato podría explicarse por su composición química, ya que la tusa de maíz presenta una proporción relativamente más alta de azúcares simples y compuestos carbonados fácilmente metabolizables, lo que favorece el crecimiento micelial y la síntesis de proteínas estructurales y enzimáticas.

Por el contrario, el raquis de maíz posee un mayor contenido de lignina, fibra cruda y minerales (Castorina et al., 2023), lo que puede limitar la biodisponibilidad de nitrógeno y reducir la asimilación proteica por parte del hongo. La elevada fracción mineral del raquis, aunque beneficiosa para otros parámetros nutricionales, puede alterar la relación C/N del sustrato, promoviendo un metabolismo más oxidativo y reduciendo la producción de biomasa proteica.

De acuerdo con Mikiashvili et al. (2006), la relación C/N del sustrato es determinante para la acumulación de proteínas en *Pleurotus*, ya que niveles de carbono fácilmente asimilables estimulan la expresión de enzimas hidrolíticas y la incorporación de nitrógeno orgánico en el micelio. Esto coincide con los resultados obtenidos, donde la tusa, al tener una composición más equilibrada en términos energéticos, permitió un mayor contenido proteico en los cuerpos fructíferos. Este comportamiento puede justificarse por el contenido diferencial de nitrógeno entre las fracciones del maíz, ya que Woźniak et al. (2021) reportaron que el material lignificado como el tallo (estructuralmente comparable al raquis) presenta solo 0.30% de nitrógeno, mientras que las fracciones más blandas, como hojas y estructuras envolventes similares a la tusa, alcanzan hasta 0.96%.

Desde el punto de vista nutricional, los hongos cosechados en base seca pueden ser declarados una excelente fuente de proteína. El Reglamento Técnico Centroamericano [RTCA] considera a un producto dentro de esta categoría cuando este contiene no menos del 20% del Valor de Referencia Nutricional (VRN) del nutriente (RTCA, 2023). Para proteína, el VRN es de 50 g por día, de manera que el valor de referencia para hacer esta declaración es no menos de 10 g de proteína en 100 g del producto. Tanto el sustrato de tusa, como el de tusa más raquis presentan valores entre 14 y 17 g, por lo que cumplen con el requerimiento establecido.

Grasa Cruda

El contenido de grasa cruda en los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* cultivados en los diferentes tratamientos presentó diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$). El hongo cultivado

en tusa mostró un contenido lipídico promedio de 2.18%, mientras que el cultivado en tusa + raquis de maíz presentó un valor menor de 1.34%.

Los valores determinados se encuentran dentro del rango reportado para hongos del género *Pleurotus*, donde el contenido de grasa oscila entre 1% y 3% en base seca (Yusran et al., 2022). Por ejemplo, Effiong et al. (2023) reportaron 1.21% de grasa en *P. ostreatus* cultivado en paja de arroz y aserrín, mientras que Pineda et al. (2016) obtuvieron 1.6 a 2.2% en bagazo de caña. Los valores obtenidos en este estudio coinciden con los reportes de la literatura y confirman que *Pleurotus ostreatus* es un hongo naturalmente bajo en grasa. Esta característica constituye una cualidad nutricional destacada, ya que, según Vega y Franco (2013), el reducido contenido de lípidos en los hongos comestibles es un atributo valioso que produce efectos beneficiosos en la salud.

La disminución del contenido graso en el tratamiento con tusa + raquis de maíz podría estar relacionada con las propiedades fisicoquímicas del raquis. Este material presenta un alto contenido de fibra cruda (celulosa, hemicelulosa y lignina) y una fracción considerable de cenizas y minerales (Kanengoni et al., 2015). Sin embargo, posee baja concentración de carbohidratos solubles y azúcares reductores, lo cual puede limitar la disponibilidad de sustratos energéticos necesarios para la biosíntesis de lípidos durante el crecimiento del hongo.

Desde una perspectiva agroindustrial, un menor contenido de grasa es una característica deseable, ya que contribuye a una mayor estabilidad oxidativa y reduce la probabilidad de rancidez durante el almacenamiento (Wang et al., 2023). Esto prolonga la vida útil postcosecha y mejora la calidad sensorial del producto. Asimismo, desde el punto de vista nutricional, ambos tratamientos generan hongos que pueden ser considerados bajos en grasa, de acuerdo con el RTCA (2023), ya que contienen no más de 3 g de grasa por 100 g de producto en base seca. Por ello, la baja proporción de lípidos convierte a los hongos cultivados sobre tusa + raquis de maíz en un alimento saludable, de bajo valor calórico y potencial funcional, apropiado para consumidores que buscan productos naturales y con menor perfil de grasa.

Carbohidratos

El contenido de carbohidratos digeribles en *Pleurotus ostreatus* suele ser la fracción más abundante dentro la composición proximal. En esta investigación, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos ($P > 0.05$), donde los valores oscilaron entre 43.00% y 43.28%. Diversos estudios han reportado valores similares a los obtenidos, Bellettini et al. (2019) encontraron valores de 43.6% a 52.1% en hongos cultivados sobre residuos de trigo y aserrín. Del mismo modo, otros estudios mencionan valores entre 34.94% y 52.04%, utilizando sustratos como el bagazo de caña, aserrín y residuos del maíz; indicando que el tipo de sustrato afecta la composición de los carbohidratos.

Durante el crecimiento de *Pleurotus ostreatus*, la composición de carbohidratos está más ligada al metabolismo del hongo que relacionado al sustrato en sí. Esto significa que el hongo ajusta su metabolismo para mantener la producción de polisacáridos esenciales y carbohidratos solubles dentro de rangos constantes. Zhou et al. (2016) explican que, durante la etapa de fructificación, el metabolismo se orienta hacia la acumulación de carbohidratos solubles y alcoholes de azúcar como manitol y trehalosa, que actúan como fuente de energía rápida. En este estudio se demostró que independientemente de la fuente de carbono, *Pleurotus ostreatus* mantuvo proporciones constantes de diversos azúcares, reflejando un mecanismo homeostático de control interno más que una respuesta directa a la composición química del sustrato. Proceso que se explica con más detalle en el análisis de fibra dietética.

Fibra Dietética

Según Stribling y Ibrahim (2023) la fibra dietética está compuesta por partes comestibles de plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado humano. Con esta definición se puede decir que la fibra presente en los hongos comestibles cumple una función estructural, motivo por el cual resulta relevante cuantificar su contenido en el cuerpo fructífero del hongo.

El análisis proximal mostró que el contenido de fibra dietética total en los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* no presentó diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre los tratamientos evaluados. Los hongos cultivados sobre tusa registraron un valor promedio de $31.36 \pm 2.55\%$, mientras que aquellos desarrollados en la mezcla tusa + raquis alcanzaron $31.83 \pm 5.08\%$. Estos resultados indican que la adición del raquis de maíz al sustrato no afectó de manera significativa la capacidad del hongo para sintetizar o acumular compuestos fibrosos durante su desarrollo.

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado para *Pleurotus ostreatus* cuyo contenido de fibra suele variar entre 24 y 31%. Este elevado porcentaje se debe a que los hongos poseen una pared celular rica en polisacáridos estructurales, principalmente quitina, β -glucanos, hemicelulosas y pequeñas fracciones de celulosa, los cuales otorgan resistencia mecánica y estabilidad osmótica al tejido fúngico (Cheung, 2013).

A diferencia de tejidos vegetales donde la fibra está compuesta principalmente por celulosa y lignina, la fibra de los hongos incluye β -glucanos con enlaces mixtos (1,3 y 1,6). De acuerdo con Zhu et al. (2015), los β -glucanos fúngicos son polisacáridos estructurales constituidos por unidades de D-glucosa, que forman parte de la fracción de fibra dietética, los cuales poseen propiedades antitumorales e inmunoestimulantes. Estas características hacen que los β -glucanos sean considerados componentes funcionales de la dieta, con beneficios comprobados sobre la salud cardiovascular y metabólica.

La similitud observada entre tratamientos sugiere que la formación de compuestos fibrosos en *Pleurotus ostreatus* está más influenciada por procesos biológicos del propio hongo que por la composición del sustrato. Esto debido a que la formación de β -glucanos y quitina dependen principalmente de la actividad enzimática del micelio y de la etapa en la que crece el carpóforo, más que del contenido de lignina o hemicelulosa presente en el material de cultivo (Sánchez, 2010).

Durante la fase vegetativa, el micelio centra su metabolismo en la degradación del sustrato mediante enzimas lignocelulolíticas, mientras que, en la fructificación, la actividad metabólica se

orienta a la síntesis de polisacáridos estructurales que fortalecen la pared celular. Factores como temperatura, humedad y oxigenación también influyen en la expresión enzimática, siendo necesarias condiciones estables y buena aireación para favorecer la biosíntesis de fibra. Esta capacidad metabólica explica la similitud en el contenido de fibra dietética entre tratamientos, reflejando la eficiencia del hongo para mantener su composición estructural incluso bajo diferentes condiciones de cultivo.

De acuerdo con el RTCA (2023), en su Anexo E, un alimento puede declararse como “alto en fibra” cuando contiene al menos 6 g de fibra dietética por cada 100 g o 3 g por 100 kcal. En esta investigación, los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* cultivados tanto en tusa como en tusa más raquis de maíz presentaron un contenido promedio cercano al 31% de fibra dietética, valor que supera ampliamente los requisitos establecidos. Por lo tanto, el hongo evaluado puede clasificarse como un alimento “alto en fibra”, lo que refuerza su potencial funcional.

Cenizas

El contenido de cenizas representa la fracción inorgánica del tejido fúngico que permanece tras la combustión del material orgánico, reflejando la cantidad total de minerales esenciales presentes en el alimento. En este estudio se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados: los hongos cultivados únicamente en tusa presentaron un contenido de cenizas de 6.32%, mientras que aquellos cultivados en tusa + raquis de maíz alcanzaron 9.05% ($P < 0.05$). Este incremento demuestra que la inclusión del raquis favoreció una mayor absorción y acumulación de minerales por parte del micelio durante el crecimiento y la fructificación.

El raquis de maíz es una estructura densa, rígida y con alto contenido de lignina y celulosa cristalina, lo que reduce su porosidad y permeabilidad al agua, pero le otorga una liberación lenta y sostenida de nutrientes minerales. Esta característica permite que, durante el proceso de degradación lignocelulósica, los minerales contenidos en su matriz, principalmente calcio, fósforo, potasio,

magnesio y sílice, sean liberados gradualmente y absorbidos por el micelio, enriqueciendo la composición mineral del hongo.

Raman et al. (2020) indicó que el contenido de cenizas en *Pleurotus ostreatus* varía entre 2% y 9% dependiendo del tipo de sustrato, rango que coincide con los valores obtenidos en este estudio. De manera similar, Lucas de Jesus et al. (2023) demostró que la adición de materiales ricos en minerales al sustrato incrementa la bioacumulación de elementos como calcio, zinc y fósforo en los cuerpos fructíferos. Estos resultados respaldan que el raquis actuó como una fuente mineral suplementaria, contribuyendo al aumento significativo de cenizas observado. Rusu et al. (2025) señaló que los sustratos con mayor contenido de lignina y sílice, aunque menos porosos, permiten una liberación sostenida de cationes como K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , lo que favorece la mineralización del tejido fúngico.

El mayor contenido de cenizas en los hongos cultivados con tusa + raquis demuestra que la adición de este subproducto no solo mejora la composición mineral del hongo, sino que también representa una alternativa sostenible para valorizar residuos agrícolas. Desde una perspectiva agroindustrial, este incremento en minerales es favorable, ya que mejora el valor nutricional del producto final, aportando micronutrientes esenciales como calcio, fósforo y magnesio. Además, el uso del raquis de maíz como co-sustrato contribuye a la reducción de desechos agrícolas y promueve sistemas de producción más sostenibles.

Micronutrientes

El Cuadro 9 presenta los resultados de los minerales evaluados. Se evidencia que no hubo diferencias significativas ($P > 0.05$) en la mayoría de los minerales evaluados, a excepción del sodio (Na), donde se reporta un mayor valor en el tratamiento con tusa. Asimismo, se presenta el requerimiento de cada micronutriente de acuerdo con el RTCA (2023), destacando el potasio (K),

donde los valores reportados se encuentran por encima de los 3500 mg por día para ambos tratamientos.

Cuadro 9

Composición de minerales (mg/100 g) de harina de Pleurotus ostreatus cultivado en dos sustratos distintos.

Mineral	Tusa Media (mg) ± DE	Tusa + Raquis Media (mg) ± DE	Pr > t	CV (%)	Requerimiento (mg/día)*
K	4570.30 ± 472.80	5178.8 ± 427.70	0.1737	8.96	3500
Ca	30.15 ± 15.62	11.31 ± 5.79	0.1217	33.72	1000
Na	76.25 ± 3.98	68.11 ± 1.39	0.0287	2.75	2000
Fe	6.21 ± 1.40	6.34 ± 0.23	0.8826	14.44	18

Nota. Pr > |t|: Probabilidad agrupada (varianzas iguales), ≤ 0.05 indica diferencias estadísticas entre tratamientos. CV: Coeficiente de variación. *Requerimiento de acuerdo con el RTCA (2023).

El K es el mineral predominante en ambos tratamientos, esto es coherente con la literatura. Estudios han demostrado que el potasio se encuentra en mayor proporción en el hongo *Pleurotus ostreatus*. Salami et al. (2017) reporta valores de 2088 a 2281 mg por cada 100 g del producto cosechado en residuos del maíz, palma y aserrín. Del mismo modo, Nieto Juárez et al. (2020) reporta valores entre 1400 y 1550 mg. Estos resultados están muy por debajo de lo obtenido en este estudio.

Sin embargo, esto puede justificarse con la composición de los minerales presentes en los sustratos utilizados. Neno et al. (2019) menciona que el potasio se concentra especialmente en tejidos vasculares del maíz, por lo que residuos del maíz pueden contener entre 1.9% y 5.4% de potasio en base seca. De manera que, la mayor parte del potasio absorbido por el cultivo de maíz no se acumula en el grano, sino que permanece en estructuras vegetativas. Estas partes representarían más del 60% del potasio total absorbido por la planta (Bayer CropScience, 2025). Por lo tanto, los valores elevados pueden explicarse por la alta concentración natural de este micronutriente en los residuos de maíz y la capacidad a absorción por parte del hongo. En términos nutricionales, esto resulta beneficioso ya que es un mineral que contribuye a la función muscular y nerviosa y al control de la presión arterial.

En cuanto al sodio, se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Este es un nutriente esencial en pequeñas cantidades que mantiene los fluidos corporales en equilibrio, al igual que los músculos y nervios funcionando adecuadamente. Un exceso de este nutriente podría causar problemas como la hipertensión. Los resultados encontrados (68.11 a 77.25 mg/100 g) se encuentran por debajo de valores reportados por Salami et al. (2017), quienes reportaron de 277 a 359 mg/100g del hongo. De acuerdo con el RTCA (2023), puede ser considerado como un alimento bajo en sodio, ya que su contenido está por debajo de los 120 mg/100 g de alimento.

Finalmente, el contenido de hierro varió entre 6.21 y 6.34 mg/100 g, lo cual es cercano a los 9.66 mg/100 g reportados por Effiong et al. (2023). Los valores encontrados rondan el 35% de la ingesta recomendada diaria, por lo que podría ser considerado como fuente de hierro (RTCA, 2023). Sus principales roles en el organismo son el transporte de oxígeno, participación en el metabolismo energético, fomentar el trabajo normal de glóbulos blancos y contribuir en el desarrollo cerebral (Milman, 2012). Finalmente, el calcio se encontró entre 11.31 y 30.15 mg/100 g, difiriendo de estudios que han determinado un contenido de 47 mg/100 g Carrasco et al. (2021). Este micronutriente juega un papel fundamental en la salud ósea y contracción muscular (Martínez de Victoria, 2016).

Perfil de Ácidos Grasos

El perfil de ácidos grasos para cada uno de los tratamientos se muestra en el Cuadro 10. Se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) para cada uno de los ácidos grasos detectados. Asimismo, se determinó el contenido total de ácidos grasos saturados (SAFA), monoinsaturados (MUFA) y poliinsaturados (PUFA); reportando los valores en miligramos por cada 100 gramos del alimento.

Cuadro 10

Perfil de ácidos grasos en 100 g de harina de Pleurotus ostreatus en dos sustratos distintos.

Perfil de Ácidos Grasos	Tusa Media (mg) ± DE	Tusa + Raquis Media (mg) ± DE	Pr > t	CV (%)
C14:0	ND	4.52 ± 0.92	NA	NA
C15:0	22.73 ± 3.64	12.54 ± 4.42	0.0369	16.10
C16:0	486.40 ± 8.09	268.60 ± 10.68	<.0001	2.63
C18:0	171.70 ± 12.20	49.29 ± 1.99	<.0001	7.84
C16:1, n9 (ω-7)	7.43 ± 0.78	4.83 ± 0.37	0.0064	5.55
C18:1, n9 (ω-9)	742.70 ± 10.90	438.50 ± 7.65	<.0001	1.75
C18:2, n9, 12 (ω-6)	713.40 ± 16.90	503.40 ± 17.92	0.0001	7.80
C24:1, n15	35.65 ± 1.84	8.23 ± 0.67	<.0001	3.64
Σ SAFA	680.90 ± 6.51	335.00 ± 10.33	<.0001	2.31
Σ MUFA	785.70 ± 11.45	451.60 ± 7.72	<.0001	1.76
Σ PUFA	713.4 ± 16.90	503.40 ± 17.92	0.0001	3.64

Nota. Pr > |t|: Probabilidad agrupada (varianzas iguales), ≤ 0.05 indica diferencias estadísticas entre tratamientos. CV: Coeficiente de variación; SAFA = Ácidos grasos saturados; MUFA = Ácidos grasos monoinsaturados; PUFA = Ácidos grasos poliinsaturados; ND = No detectado; NA = No aplica.

En cuanto al perfil de ácidos grasos encontrados, es distintiva la aparición de ácido mirístico (C14:0) únicamente en el tratamiento de tusa más raquis. Este es un ácido que no se encuentra comúnmente reportado para *Pleurotus ostreatus*. Sin embargo, su presencia podría atribuirse a una respuesta metabólica inducida por condiciones más fibrosas y lignificadas presentes en el raquis de maíz. En sustratos con menor contenido de azúcares solubles y mayor proporción de lignina, el hongo puede favorecer la síntesis de ácidos grasos de cadena media, para ser utilizados como fuente rápida de energía (Hoa et al., 2015). De manera que, cuando el hongo se enfrenta a un sustrato menos nutritivo, este ajusta su metabolismo para mantener la integridad de su membrana y el equilibrio energético. Este es un patrón observado en materiales con baja degradabilidad, donde la composición del sustrato induce variaciones en la longitud y saturación de los ácidos grasos (Elkanah et al., 2022).

Por otro lado, para ambos tratamientos se detectó una mayor cantidad de ácido palmítico (C16:0), ácido esteárico (C18:0), ácido oleico (C18:1) y ácido linoleico (18:2). Estos ácidos grasos son característicos de *Pleurotus ostreatus*, estudios como el de Benavides et al. (2015) reportan mayor porcentaje de C16:0, C18:1 y C18:2; este último en mayor proporción. En especial, el ácido linoleico

es esencial ya que es el ácido graso poliinsaturado más reportado en *Pleurotus ostreatus* (Vallejo Torres et al., 2017)

Además, el ácido linoleico tiene un rol importante en la formación de compuestos volátiles aromáticos, los cuales determinan las propiedades sensoriales de *Pleurotus*. Morath et al. (2012) señalan que es el precursor directo de alcoholes, aldehídos y cetonas de ocho carbonos, que son los responsables del aroma típico de hongos comestibles. Entre estos compuestos se encuentra el 1-octen-3-ol, conocido como “alcohol de la seta”, que produce notas terrosas y frescas. Turiño (2016) explica que este compuesto se forma por la oxidación enzimática del ácido linoleico por lipoxigenasas, dando como resultado moléculas volátiles que se liberan durante el desarrollo del cuerpo fructífero y la manipulación poscosecha.

Del mismo modo, la concentración de los cuatro ácidos grasos principales encontrados puede verse ligada al contenido de grasa reportado anteriormente. El sustrato que contaba solamente con tusa obtuvo un mayor porcentaje de grasa en comparación al de tusa con raquis. La tusa de maíz es menos densa, lo que facilita la aireación, retención de humedad y disponibilidad de carbono. En contraste, Ruilova Cueva y Hernández (2014) mencionan que el raquis de maíz presenta una estructura más compacta y lignificada, lo que puede reducir la disponibilidad de nutrientes y limitar la síntesis de ácidos grasos.

Prueba de Aceptación

Se determinó la aceptación sensorial de la integración del hongo *Pleurotus ostreatus* en una salchicha tipo bratwurst, sustituyendo porcentajes de carne magra. En el Cuadro 11 se observan los atributos evaluados, comparando el tratamiento testigo con el tratamiento 1 (25% de sustitución cárnica) y tratamiento 2 (50% de sustitución cárnica). En general, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para ninguno de los atributos. Esto significa que las salchichas con una sustitución de hasta el 50% de carne presentan características sensoriales similares, de manera que no cambia la aceptación sensorial por parte del consumidor.

Cuadro 11

Medias de las características sensoriales de la prueba de aceptación de la salchicha tipo bratwurst.

Tratamientos	Apariencia	Color	Olor	Sabor	Textura	Aceptación general
	Media ± DE	Media ± DE	Media ± DE	Media ± DE	Media ± DE	Media ± DE
Testigo	7.25 ± 1.42	7.18 ± 1.52	7.31 ± 1.44	7.76 ± 1.29	7.23 ± 1.13	7.67 ± 1.20
Trt 1	6.89 ± 1.65	6.92 ± 1.61	7.53 ± 1.27	7.56 ± 1.43	7.01 ± 1.13	7.40 ± 1.21
Trt 2	7.02 ± 1.87	7.25 ± 1.76	7.40 ± 1.54	7.67 ± 1.46	7.25 ± 1.29	7.65 ± 1.47
Pr > F	0.2440	0.2574	0.4527	0.2080	0.2138	0.2277
CV (%)	21.89	20.72	17.35	15.25	17.15	15.80

Nota. Pr > F: Probabilidad, > 0.05 indica que no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos. CV: Coeficiente de variación. DE: Desviación estándar; Trt 1 = Tratamiento con 25% de sustitución cárnica por pre-emulsión con harina de hongo; Trt 2 = Tratamiento con 50% de sustitución cárnica por pre-emulsión con harina de hongo. Escala hedónica de 9 puntos donde 1: me disgusta extremadamente; 5: ni me gusta ni me disgusta; 9: me gusta extremadamente.

A nivel general, los puntajes de aceptación se ubicaron dentro del rango de “me gusta moderadamente” a “me gusta mucho”, destacando que el tratamiento testigo alcanzó un promedio de 7.67, seguido de Trt 2 (7.65) y Trt 1 (7.40). Esta tendencia sugiere que la sustitución parcial de proteína cárnica por pre-emulsión con harina de hongo no afectó negativamente la percepción global del producto, lo cual es un resultado favorable considerando que este tipo de sustituciones puede modificar atributos sensoriales relevantes como el color, sabor o textura.

El buen nivel de aceptación en este estudio puede explicarse por la capacidad del hongo para retener agua y grasa, lo que aporta jugosidad y mejora la textura del producto final. Según Jung et al. (2022), el polvo de *Pleurotus* actúa como estabilizante natural en emulsiones cárnicas, mejorando la cohesión y la estructura interna del gel proteico, lo que resulta en una mordida más firme y agradable.

Estos resultados coinciden también con lo señalado por Tokarczyk et al. (2023), quienes demostraron que la adición de hongo ostra en hamburguesas de pescado mejoró el perfil nutricional sin alterar de manera significativa la aceptación sensorial. De esta forma, el hongo se consolida como un ingrediente funcional con alto potencial en reformulaciones cárnicas. Por otra parte, la ausencia de diferencias significativas en apariencia y color entre los tratamientos puede atribuirse a que la pre-

emulsión con harina de hongo se integró adecuadamente en la matriz proteica, evitando alteraciones visibles en el tono o la superficie del producto.

En cuanto al sabor, los valores obtenidos (entre 7.53 y 7.76) se encuentran dentro de los rangos reportados para productos cárnicos enriquecidos con hongos. Esto podría deberse a la presencia de aminoácidos libres y nucleótidos bioactivos como el glutamato, Inosin monofosfato (IMP) y Guanosín monofosfato (GMP), responsables del sabor umami característico, tal como lo describe Panda et al. (2025) en su revisión sobre el uso de hongos como fuente emergente de proteínas y mejoradores del sabor en alimentos cárnicos. Estos resultados confirman que la incorporación de harina de *Pleurotus ostreatus* puede considerarse una estrategia tecnológica viable y sostenible para desarrollar embutidos de tipo bratwurst con menor contenido cárnico, sin comprometer la aceptabilidad del consumidor.

Del mismo modo, en el Cuadro 12 se observan los resultados del análisis de correlación de los atributos evaluados respecto a la aceptación general de la salchicha tipo bratwurst. Todos los atributos influyeron de manera significativa. La apariencia, color, olor y textura muestran una correlación positiva media ($0.50000 > r > 0.79000$), mientras que el sabor presenta una correlación positiva alta ($r > 0.80000$). Siendo este último el que tuvo una mayor relación con la aceptación general.

Cuadro 12

Análisis de correlación de los atributos de la salchicha tipo bratwurst.

Atributos	Aceptación general	
	r	P > r
Apariencia	0.72182	<.0001
Color	0.73559	<.0001
Olor	0.63907	<.0001
Sabor	0.82101	<.0001
Textura	0.68423	<.0001

Nota. r: coeficiente de correlación o índice de Pearson; P > |r|: probabilidad.

Prueba de Preferencia

En el Cuadro 13 se presentan los resultados de la prueba de Basker y Kramer para la preferencia de los productos. Los valores obtenidos de la diferencia entre columna y fila fueron comparados con un Valor Crítico de Referencia entre la suma de categorías (Anexo K). El valor utilizado para este análisis correspondió a 33.1, al haber utilizado 3 muestras y 100 panelistas. De manera que, los tratamientos fueron igual de preferidos, ya que el valor absoluto de las diferencias no supera el valor crítico establecido.

Cuadro 13

referencia de la salchicha tipo bratwurst utilizando la prueba de Basker y Kramer.

	Tratamientos	Testigo	Trt 1	Trt 2
	Suma de categorías	202	218	192
Testigo	202	0	-16	10
Trt 1	218	16	0	26
Trt 2	192	-10	-26	0

Nota. Trt 1 = Tratamiento con 25% de sustitución cárnica por pre-emulsión con harina de hongo; Trt 2 = Tratamiento con 50% de sustitución cárnica por pre-emulsión con harina de hongo. Valor crítico: 33.1.

Conclusiones

El proceso de obtención del *spawn* de *Pleurotus ostreatus* desarrollado en condiciones de laboratorio permitió obtener una semilla libre de contaminantes y con completa colonización del grano de sorgo a los 15 días de incubación, demostrando un adecuado nivel de hidratación y condiciones óptimas de crecimiento micelial en el sustrato.

Los sustratos evaluados influyeron en el perfil nutricional de *Pleurotus ostreatus*. En cuanto a los macronutrientes, los hongos cosechados en la bráctea del maíz mostraron valores mayores en proteína y grasa, mientras que el sustrato con incorporación de raquis de maíz tuvo mayor contenido de cenizas. Los minerales no variaron, a excepción del sodio que fue mayor en el sustrato de tusa.

La incorporación del hongo en la salchicha tipo bratwurst no afectó de forma negativa los atributos de sabor, textura, apariencia, color y olor; demostrando su potencial como ingrediente funcional en productos cárnicos reformulados para la industria alimentaria.

Recomendaciones

Comparar el perfil nutricional de *Pleurotus ostreatus* a partir de su producción en otros residuos lignocelulósicos provenientes de la industria agroalimentaria.

Realizar análisis fisicoquímico de la salchicha tipo bratwurst para los dos tratamientos con incorporación parcial de harina de hongo.

Incorporar un análisis de perfil de aminoácidos en la salchicha tipo bratwurst para determinar la calidad proteica del producto.

Evaluar la vida útil y estabilidad microbiológica de la salchicha tipo bratwurst durante su almacenamiento en refrigeración.

Realizar un estudio económico que contemple todo el proceso productivo de *Pleurotus ostreatus*, desde el cultivo del hongo hasta su incorporación en la formulación de la salchicha tipo bratwurst, para determinar su sostenibilidad y factibilidad.

Evaluar mediante una caracterización los sustratos lignocelulósicos utilizados para conocer sus porcentajes de carbono y nitrógeno.

Referencias

- Ab Rhaman, S. M. S., Naher, L. y Siddiquee, S. (2021). Mushroom Quality Related with Various Substrates' Bioaccumulation and Translocation of Heavy Metals. *Journal of Fungi (Basel, Switzerland)*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/jof8010042>
- Abou Fayssal, S., El Sebaaly, Z. y Sassine, Y. N. (2023). Pleurotus ostreatus Grown on Agro-Industrial Residues: Studies on Microbial Contamination and Shelf-Life Prediction under Different Packaging Types and Storage Temperatures. *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/foods12030524>
- Álvarez-Solís, J. D., Muñoz-Arroyo, R., Huerta, E. y Nahed, J. (2016). Balance parcial de nitrógeno en el sistema de cultivo de maíz (*Zea mays* L.) con cobertura de leguminosas en Chiapas, México. *Agronomía Costarricense*, 40(1), 29–39. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43646210002>
- Bach, F., Helm, C. V., Bellettini, M. B., Maciel, G. M. y Haminiuk, C. W. I. (2017). Edible mushrooms: a potential source of essential amino acids, glucans and minerals. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(11), 2382–2392. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13522>
- Balseca, J., Jácome, S. y Tapia, A. (2021). Economía circular a través de la producción de hongos comestibles en residuos agrícolas. *MKTDescubre*, 1, 83–90. <http://revistas.epoch.edu.ec/index.php/mktdescubre/article/view/564>
- Bandura, I. I., Kulyk, A. S., Makohon, S. V., Khareba, O. V. y Khareba, V. V. (2021). Influence of the substrate composition on the yield and nutritional value of the fruiting bodies of the edible mushrooms *Pleurotus citrinopileatus* and *Cyclocybe aegerita*. *Plant Varieties Studying and Protection*, 17(2), 130–138. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.17.2.2021.236519>
- Bayer CropScience. (2025). *Benefits of Potassium for Corn Production*. Bayer. <https://www.cropscience.bayer.us/articles/bayer/benefits-of-potassium-for-corn-production>
- Bellettini, M. B., Fiorda, F. A., Maievas, H. A., Teixeira, G. L., Ávila, S., Hornung, P. S., Júnior, A. M. y Ribani, R. H. (2019). Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 633–646. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
- Benavides, O., Cabrera, É., Villota, A. y Perdomo, D. (2015). Ácidos grasos del hongo funcional *pleurotus ostreatus* cultivado en residuos sólidos agroindustriales. *Producción + Limpia*, 10(1), 73–81. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5746914>
- Carrasco, J., Zied, D. C., Navarro, M. J., Gea, F. J. y Pardo-Giménez, A. (2021). Commercial Cultivation Techniques of Mushrooms. En K. R. Sridhar y S. K. Deshmukh (Eds.), *Advances in Macrofungi* (pp. 11–40). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003096818-3>
- Castorina, G., Cappa, C., Negrini, N., Criscuoli, F., Casiraghi, M. C., Marti, A., Rollini, M., Consonni, G. y Erba, D. (2023). Characterization and nutritional valorization of agricultural waste corncobs from Italian maize landraces through the growth of medicinal mushrooms. *Scientific Reports*, 13(1), 21148. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48252-9>
- Cheung, P. C. (2013). Mini-review on edible mushrooms as source of dietary fiber: Preparation and health benefits. *Food Science and Human Wellness*, 2(3-4), 162–166. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2013.08.001>

- Da Luz, J. M. R., Nunes, M. D., Paes, S. A., Torres, D. P., Da Cássia Soares Silva, M. de y Kasuya, M. C. M. (2012). Lignocellulolytic enzyme production of *Pleurotus ostreatus* growth in agroindustrial wastes. *Brazilian Journal of Microbiology: [Publication of the Brazilian Society for Microbiology]*, 43(4), 1508–1515. <https://doi.org/10.1590/S1517-838220120004000035>
- Del Greco, N. (2010). *Estudio sobre tendencias de consumo de alimentos. Primera parte: Generalidades y casos. Datos relevantes para la toma de decisiones en la agroindustria de alimentos y bebidas*. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-del-estado-de-morelos/salud-publica-y-economia/fuente-2-apuntes-1-2/11760654>
- Effiong, M. E., Umeokwochi, C. P., Afolabi, I. S. y Chinedu, S. N. (2023). Assessing the nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom). *Frontiers in Nutrition*, 10, 1279208. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1279208>
- Elkanah, F. A., Oke, M. A. y Adebayo, E. A. (2022). Substrate composition effect on the nutritional quality of *Pleurotus ostreatus* (MK751847) fruiting body. *Heliyon*, 8(11), e11841. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11841>
- Espinosa, S. y Gonzalez, M. (2023). *Nutrition: Micronutrient Intake, Imbalances, and Interventions*. National Library of Medicine. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK597352/>
- Hoa, H. T., Wang, C.-L. y Wang, C.-H. (2015). The Effects of Different Substrates on the Growth, Yield, and Nutritional Composition of Two Oyster Mushrooms (*Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus*). *Mycobiology*, 43(4), 423–434. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2015.43.4.423>
- Jung, D. Y., Lee, H. J., Shin, D.-J., Kim, C. H. y Jo, C. (2022). Mechanism of improving emulsion stability of emulsion-type sausage with oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) powder as a phosphate replacement. *Meat Science*, 194, 108993. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108993>
- Kanengoni, A. T., Chimonyo, M., Ndimba, B. K. y Dzama, K. (2015). Potential of Using Maize Cobs in Pig Diets - A Review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 28(12), 1669–1679. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0053>
- Khan, A., Amin, S., Uddin, N. y Tania, M. (2008). Comparative Study of the Nutritional Composition of Oyster Mushrooms Cultivated in Bangladesh. *Mushroom*, 1(2). https://www.researchgate.net/publication/200671580_Comparative_Study_of_the_Nutritional_Composition_of_Oyster_Mushrooms_Cultivated_in_Bangladesh#pf4
- Lanza, S. B. y Hernández, A [Adriana] (2021). ¿Cómo podemos contribuir a la construcción de sistemas alimentarios sostenibles y saludables? *Innovare: Revista De Ciencia Y Tecnología*, 10(3), 175–177. <https://doi.org/10.5377/innovare.v10i3.12989>
- Lesá, K. N., Khandaker, M. U., Mohammad Rashed Iqbal, F., Sharma, R., Islam, F., Mitra, S. y Emran, T. B. (2022). Nutritional Value, Medicinal Importance, and Health-Promoting Effects of Dietary Mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Journal of Food Quality*, 2022, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/2454180>
- Lucas de Jesus, G., José Lavoranti, O., Schafer, G., Dias de Oliveira, G., Scheffer de Andrade Silva, R. y Lorena Cuquel, F. (2023). Nutrient uptake in supplemented substrate by oyster mushroom. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 39(7), 175. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03622-3>

- Martínez de Victoria, E. (2016). El calcio, esencial para la salud [Calcium, essential for health]. *Nutricion hospitalaria*, 33(Suppl 4), 341. <https://doi.org/10.20960/nh.341>
- Mikiashvili, N., Wasser, S. P., Nevo, E. y Elisashvili, V. (2006). Effects of carbon and nitrogen sources on *Pleurotus ostreatus* ligninolytic enzyme activity. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 22(9), 999–1002. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9132-6>
- Milman, N. (2012). Fisiopatología e impacto de la deficiencia de hierro y la anemia en las mujeres gestantes y en los recién nacidos/infantes. *Revista Peruana De Ginecología Y Obstetricia*, 58(4). http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2304-51322012000400009
- Molina Castillo, S., Espinoza Ortega, A., Thomé Ortiz, H., Moctezuma Pérez, S. y Martínez García, C. G. (2022). Los hongos comestibles silvestres: Entre las neofilias y neofobias de los consumidores mexicanos. *Bosque (Valdivia)*, 43(3), 231–241. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002022000300231>
- Moon, B. y Lo, Y. M. (2014). Conventional and Novel Applications of Edible Mushrooms in Today's Food Industry. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(5), 2146–2153. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12185>
- Morath, S. U., Hung, R. y Bennett, J. W. (2012). Fungal volatile organic compounds: A review with emphasis on their biotechnological potential. *Fungal Biology Reviews*, 26(2-3), 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2012.07.001>
- Nenova, L., Benkova, M., Simeonova, T. y Atanassova, I. (2019). Nitrogen, phosphorus and potassium content in maize dry biomass under the effect of different levels of mineral fertilization. *Agricultural Science and Technology*, 11(4), 311–316. <https://doi.org/10.15547/ast.2019.04.052>
- Nieto Juárez, J. I., Cuzcano Ruiz, Á. D. y Reyes López, W. A. (2020). Estudio preliminar de la composición nutricional del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado en pulpa de café. *Revista De La Sociedad Química Del Perú*, 85(4), 422–431. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v85i4.256>
- Nketia, S., Buckman, E. S., Dzomeku, M. y Akonor, P. T. (2020). Effect of processing and storage on physical and texture qualities of oyster mushrooms canned in different media. *Scientific African*, 9, e00501. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00501>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2016). *Retos y perspectivas para la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe: de los Objetivos de Desarrollo del Milenio a los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/568f07d7-2a4a-49b2-b1f9-c3f8188b2df8/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2021). *América Latina y el Caribe son "pilar de la seguridad alimentaria mundial"*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/Latin-America-and-the-Caribbean-are-pillar-for-world-food-security/-en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2022). *La biodiversidad es la base de los sistemas agroalimentarios*. <https://www.fao.org/biodiversity/overview/es>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias. (2023). *La seguridad alimentaria y el comercio agroalimentario en América Latina y el Caribe*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/112f14f3-5c6d-43c8-b811-fdc76d97e4b7/content>
- Panda, J., Nath, P. C., Mishra, A. K., Rustagi, S., Nayak, D., Blundell, R. y Mohanta, Y. K. (2025). Mushroom: An emerging source for next generation meat analogues. *Frontiers in Nutrition*, *12*, 1638121. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1638121>
- Pineda, J., Soto, C., Guzmán, R., Santiago, N., Huaca, J., Duarte, S. y Pineda, A. (2016). Producción de hongo ostra (*Pleurotus* spp) en bagazo de caña. *ICIDCA*, *50*(1), 50–54. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223148420009>
- Quintana Zamora, J. G., Parrales Gallo, M. A., Vera Chang, J. F. y Tigselema Zambrano, S. M. (2024). Producción de *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus sapidus* con residuos agrícolas de *Glycine max*, *Oryza sativa* y *Zea mays*. *UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, *8*(1), 83–93. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v8.n1.2024.83-93>
- Rakib, M. R., Li, A. y Yee, S. (2020). Corn Husk as Lignocellulosic Agricultural Waste for the Cultivation of *Pleurotus florida* Mushroom. *BioResources*, *4*(15). https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2020/09/BioRes_15_4_7980_Rakib_LT_Corn-Husk_Lignocellulosic_Agricultural-Waste_Cultivation_Mushroom_17770.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Raman, J., Jang, K.-Y., Oh, Y.-L., Oh, M., Im, J.-H., Lakshmanan, H. y Sabaratnam, V. (2020). Cultivation and Nutritional Value of Prominent *Pleurotus* spp.: An Overview. *Mycobiology*, *49*(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/12298093.2020.1835142>
- Reglamento Técnico Centroamericano. (2023). *Etiquetado Nutricional de Productos Alimenticios Preenvasados para Consumo Humano para la Población a partir de 3 años de edad*. RTCA. <https://sde.gob.hn/wp-content/uploads/2024/03/RTCA-Etiq.-Nutricional-CPI.pdf>
- Roblero-Mejía, D. O., Aguilar-Marcelino, L. y Sánchez, J. E. (2021). Efecto de la variación del sustrato en la productividad de dos cepas de *Pleurotus* spp. *Scientia Fungorum*, *52*, e1377. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.52.1377>
- Ruilova Cueva, M. B. y Hernández, A [Aldo] (2014). Evaluación de residuos agrícolas para la producción del hongo *Pleurotus ostreatus*. *ICIDCA*, *48*(1), 54–59. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223131337008.pdf>
- Rusu, I.-C., Pascariu, O.-E., Popa, A., Diguță, C.-F., Apostol, L., Nicolcioiu, M.-B., Zăgrean, A. V. y Israel-Roming, F. (2025). The Influence of Substrate Composition on Nutritional Content and Biological Activity of Some *Pleurotus* Mushrooms Extracts. *Agriculture*, *15*(7), 791. <https://doi.org/10.3390/agriculture15070791>
- Salami, A., Bankole, F. y Salako, Y. (2017). Nutrient and Mineral Content of Oyster Mushroom (*Pleurotus florida*) Grown on Selected Lignocellulosic Substrates. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, *15*(1), 1–7. <https://doi.org/10.9734/JABB/2017/35876>

- Sánchez, C. (2010). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(5), 1321–1337. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2343-7>
- Shirur, M., Barh, A. y Annepu, S. K. (2021). Sustainable Production of Edible and Medicinal Mushrooms: Implications on Mushroom Consumption. En V. K. Hebsale Mallappa y M. Shirur (Eds.), *Climate Change and Resilient Food Systems* (pp. 315–346). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4538-6_12
- Silva, M., Ramos, A. C., Lidon, F. J., Reboredo, F. H. y Gonçalves, E. M. (2024). Pre- and Postharvest Strategies for *Pleurotus ostreatus* Mushroom in a Circular Economy Approach. *Foods (Basel, Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/foods13101464>
- Silva, S. T. D. de, Atapattu, N. S. B. M. y Kumara, K. L. W. (2023). The Water Footprint of Oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) Cultivation under Small-scale Polybag Farming Conditions in Sri Lanka. *Journal of Agricultural Sciences – Sri Lanka*, 18(2), 172–182. <https://doi.org/10.4038/jas.v18i2.10251>
- Soares, P., Almendra-Pegueros, R., Benítez-Brito, N., Fernández-Villa, T., Lozano-Lorca, M., Valera-Gran, D. y Navarrete-Muñoz, E. M. (2020). Sistemas alimentarios sostenibles para una alimentación saludable. *Revista Española De Nutrición Humana Y Dietética*, 24(2), 87–89. <https://doi.org/10.14306/renhyd.24.2.1058>
- Stribling, P. y Ibrahim, F. (2023). Dietary fibre definition revisited - The case of low molecular weight carbohydrates. *Clinical Nutrition ESPEN*, 55, 340–356. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2023.04.014>
- Sultana, S., Shamsuzzaman, M., Miah, M. A. S., Kakon, A. J., Mafi, A. H., Sen, A., Siddiqui, M. N. y Bhattacharjya, D. K. (2024). Assessment of proximate composition, mineral element profile and antioxidant properties of the edible oyster mushroom grown in Bangladesh. *Discover Food*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00216-2>
- Tokarczyk, G., Felisiak, K., Adamska, I., Przybylska, S., Hrebien-Filisińska, A., Biernacka, P., Bienkiewicz, G. y Tabaszewska, M. (2023). Effect of Oyster Mushroom Addition on Improving the Sensory Properties, Nutritional Value and Increasing the Antioxidant Potential of Carp Meat Burgers. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 28(19). <https://doi.org/10.3390/molecules28196975>
- Turiño, C. (2016). *Estudio de los compuestos volátiles de diferentes especies de setas silvestres* [Tesis de Pregrado]. Universidad de Valladolid, España. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/18196/TFG-M-N523.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vallejo Torres, C., Díaz, R., Morales, W., Vera, J. y Cortéz, T. (2017). Calidad Alimenticia del Hongo *Pleurotus ostreatus* Fresco y Deshidratado, Cultivado en Tres Residuos Agrícolas. *EspanaCiencia*, 8(2), 75–83. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7020056>
- Vásquez, J. (2024). *Valorización de residuos agrícolas disponibles en Centro América, para la producción de Pleurotus ostreatus* [Tesis de Posgrado]. Universidad Autónoma de Madrid, España.

- Vega, A. y Franco, H. (2013). Productividad y calidad de los cuerpos fructíferos de los hongos comestibles *Pleurotus pulmonarius* RN2 y *P. djamor* RN81 y RN82 cultivados sobre sustratos lignocelulósicos. *Información Tecnológica*, 24(1), 69–78. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000100009>
- Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H. y Wei, F. (2023). Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review. *Oil Crop Science*, 8(1), 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2023.02.002>
- Water Footprint Network. (2025). *Product Gallery*. Water Footprint Network. <https://www.waterfootprint.org/resources/interactive-tools/product-gallery/>
- Woźniak, M., Ratajczak, I., Wojcieszak, D., Waśkiewicz, A., Szentner, K., Przybył, J., Borysiak, S. y Goliński, P. (2021). Chemical and Structural Characterization of Maize Stover Fractions in Aspect of Its Possible Applications. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/ma14061527>
- Yusran, Y., Erniwati, E., Maksum, H., Khumaidi, A. y Setiarto, R. H. (2022). Effect of cooking on the proximate composition and minerals content of wild edible macro fungi from Lore Lindu National Park, Central Sulawesi, Indonesia. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 22(5), 20523–20541. <https://doi.org/10.18697/ajfand.110.21660>
- Zhou, S., Ma, F., Zhang, X. y Zhang, J. (2016). Carbohydrate changes during growth and fruiting in *Pleurotus ostreatus*. *Fungal Biology*, 120(6-7), 852–861. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2016.03.007>
- Zhu, F., Du, B., Bian, Z. y Xu, B. (2015). Beta-glucans from edible and medicinal mushrooms: Characteristics, physicochemical and biological activities. *Journal of Food Composition and Analysis*, 41, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.01.019>

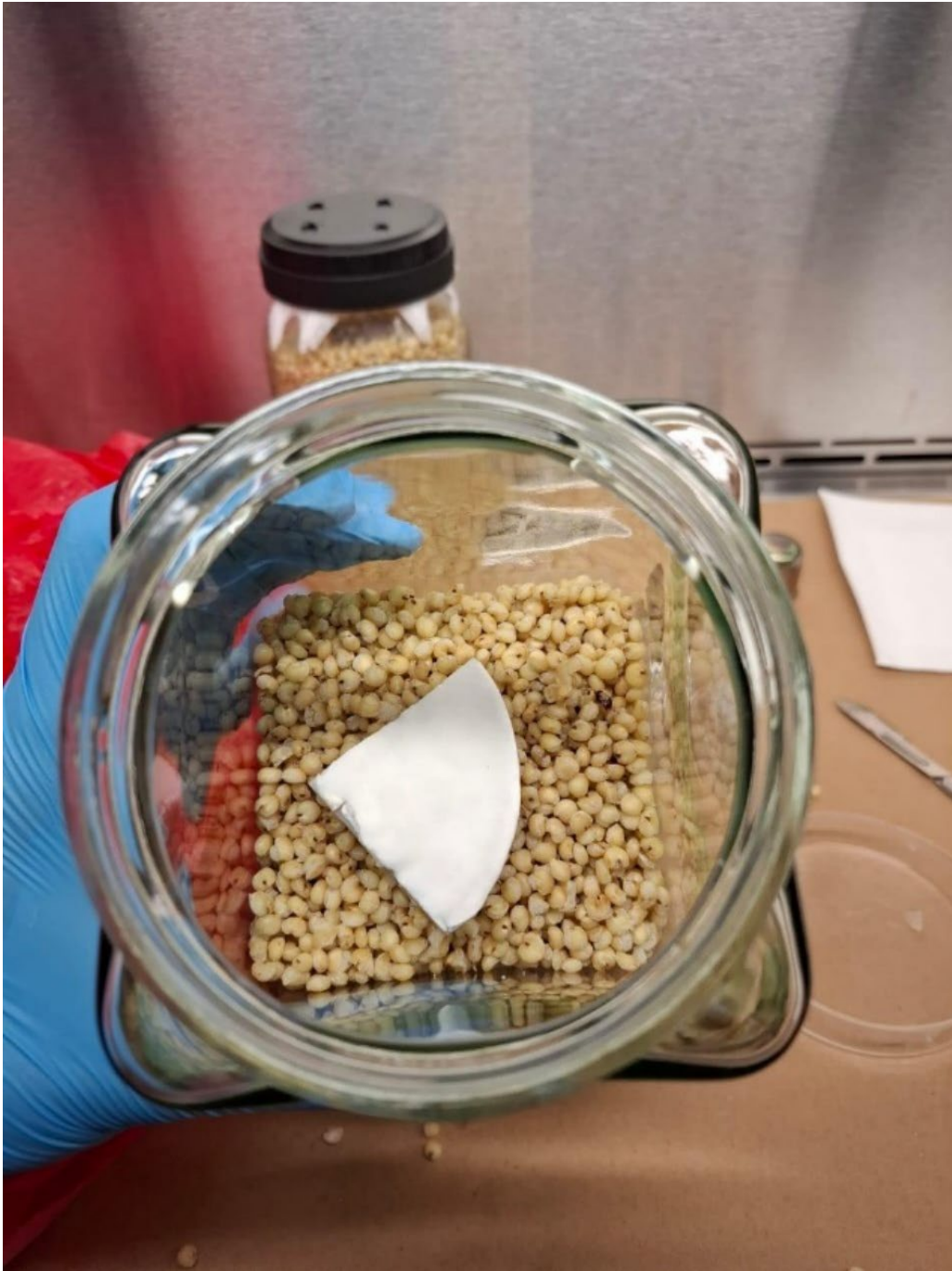
Anexos**Anexo A**

Multiplicación de micelio con cultivo de referencia Ecosur 1123.



Anexo B

Inoculación en granos de sorgo para obtención de semilla primaria.



Anexo C

Bolsas con sustrato inoculado con micelio de Pleurotus ostreatus.



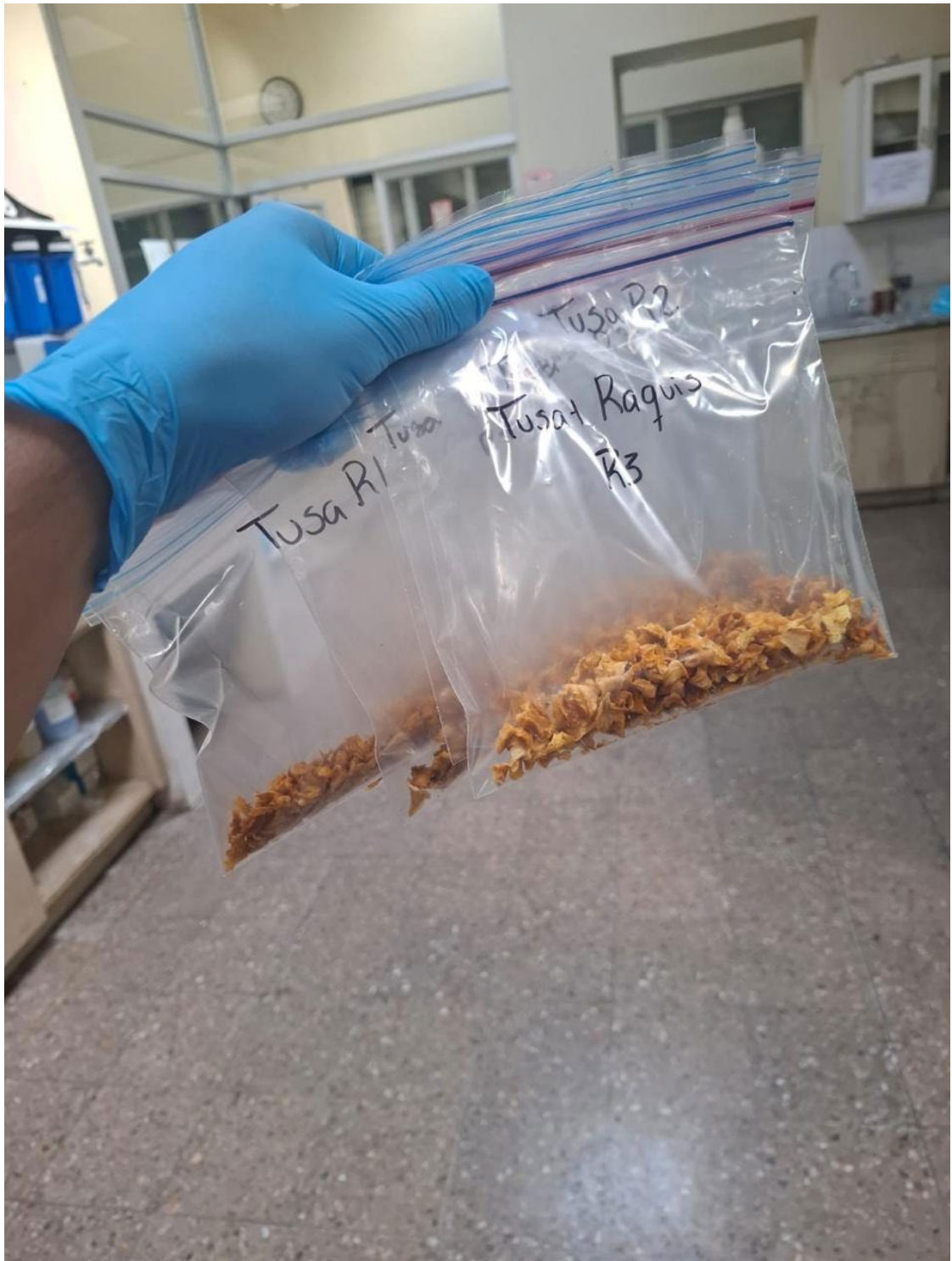
Anexo D

Hongos cosechados en bandejas limpias y ventiladas.



Anexo E

Hongos deshidratados.



Anexo F

Harina de hongo para caracterización nutricional y realización de pre-emulsión (reemplazo proteico).



Anexo G

Procesador de alimentos para realización de pre-emulsión (reemplazo proteico) con harina de hongo.



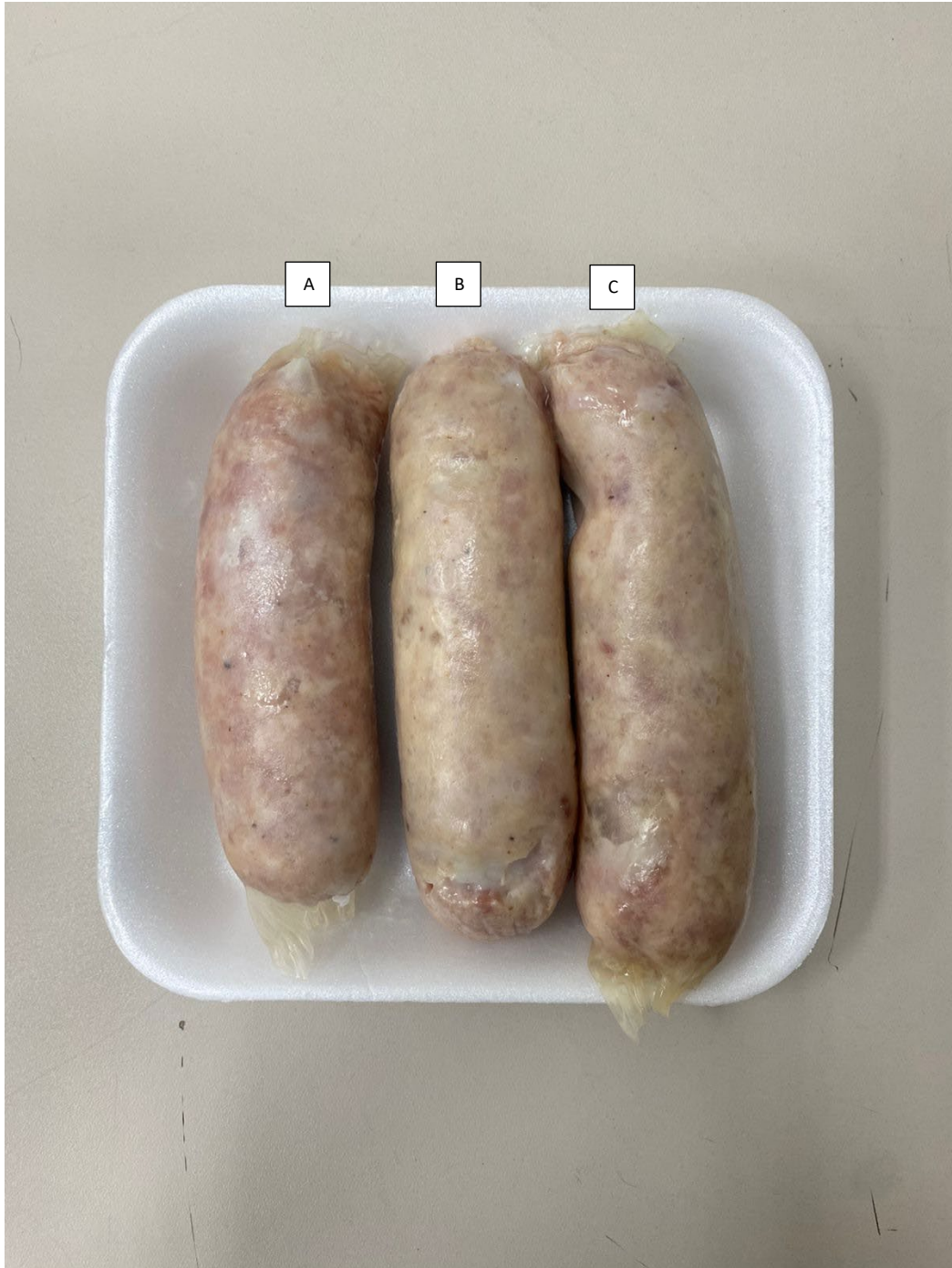
Anexo H

Pre-emulsión (reemplazo proteico) con harina de hongo.



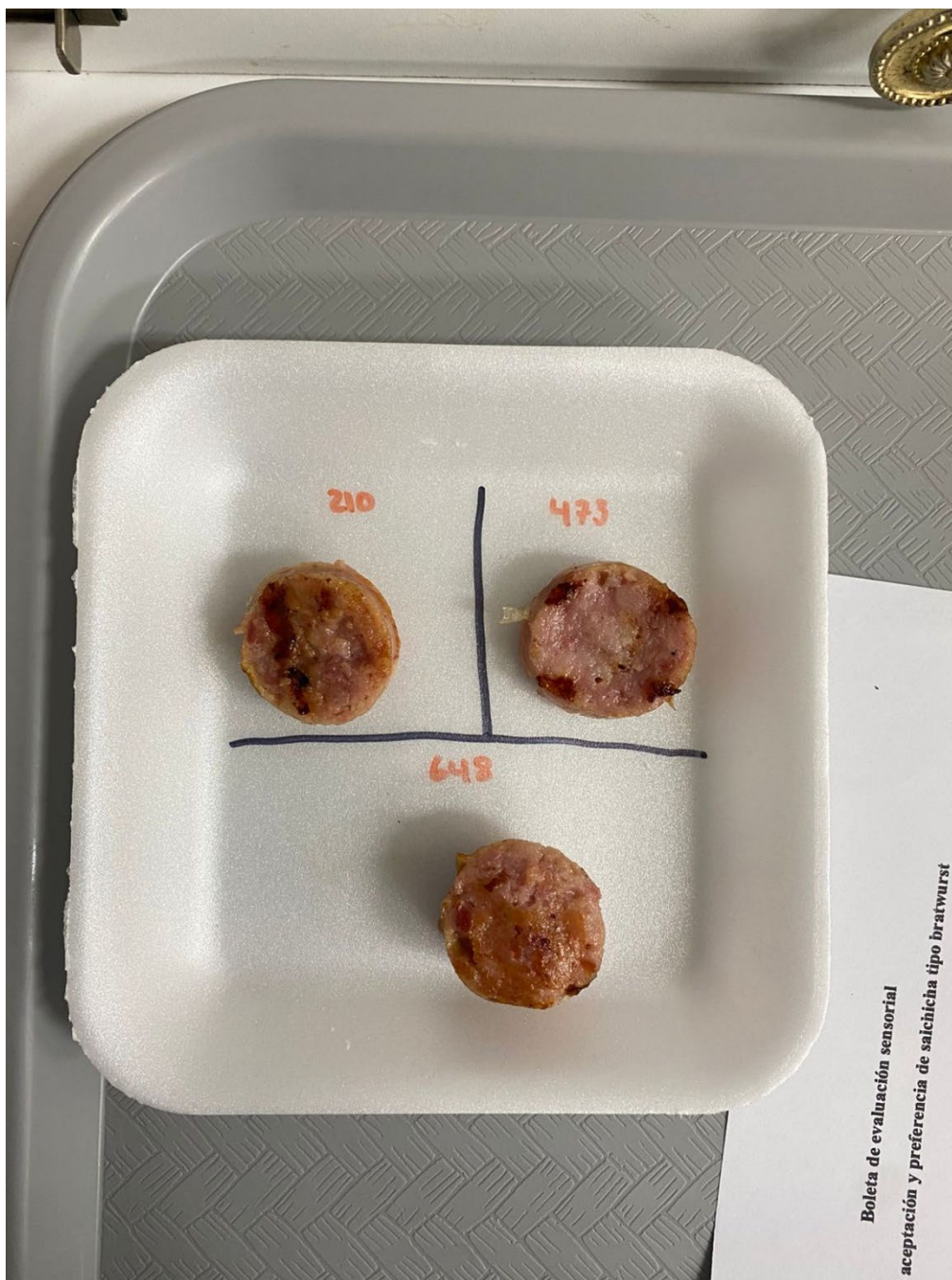
Anexo I

Salchichas tipo bratwurst testigo y con sustituciones parciales de la pre-emulsión (reemplazo proteico) con harina de hongo. (A) Testigo 100% carne. (B) Sustitución al 25%. (C) Sustitución al 50%.



Anexo J

Salchichas tipo Bratwurst con sustituciones parciales de la pre-emulsión con harina de hongo servidas en la evaluación sensorial. (A) Testigo 100% carne. (B) Sustitución al 25%. (C) Sustitución al 50%.



Anexo K

Prueba de Basker y Kramer utilizada para conocer valor crítico de diferencia entre suma de categorías.

Número de panelistas	Número de productos								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	8.8	14.8	21.0	27.3	33.7	40.3	47	53.7	60.6
21	9.0	15.2	21.5	28.0	34.6	41.3	48.1	55.1	62.1
22	9.2	15.5	22.0	28.6	35.4	42.3	49.2	56.4	63.5
23	9.4	15.9	22.5	29.3	36.2	43.2	50.3	57.6	65.0
24	9.6	16.2	23.0	29.3	36.9	44.1	51.4	58.9	66.4
25	9.8	16.6	23.5	29.9	37.7	45.0	52.5	60.1	67.7
26	10.0	16.9	23.9	30.5	38.4	45.9	53.5	61.3	69.1
27	10.2	17.2	24.4	31.1	39.2	46.8	54.6	62.4	70.4
28	10.4	17.5	24.8	31.7	39.9	47.7	55.6	63.6	71.7
29	10.6	17.8	25.3	32.3	40.6	48.5	56.5	64.7	72.9
30	10.7	18.2	25.7	32.8	41.3	49.3	57.5	65.8	74.2
31	10.9	18.5	26.1	33.4	42.0	50.2	59.4	66.9	75.4
32	11.1	18.7	26.5	34.0	42.6	51.0	60.3	60.3	76.6
33	11.3	19.0	26.9	35.0	43.3	51.7	61.2	69.0	77.8
34	11.4	19.3	27.3	35.6	44.0	52.5	62.1	70.1	79.0
35	11.6	19.6	27.7	36.1	44.6	53.3	63	71.1	80.1
36	11.8	19.9	28.1	36.6	45.2	54.0	63.9	72.1	81.3
37	11.9	20.2	28.5	37.1	45.9	54.8	64.7	73.1	82.4
38	12.1	20.4	28.9	37.6	46.5	55.5	67.2	74.1	83.5
39	12.2	20.7	29.3	38.1	47.1	56.3	65.6	75.0	84.6
40	12.4	21.0	29.7	38.6	47.7	57.0	66.4	76.0	85.7
41	12.6	21.2	30.0	39.1	48.3	57.7	67.2	76.9	86.7
42	12.7	21.5	30.4	39.5	48.9	58.4	68	77.9	87.8
43	12.9	21.7	30.8	40.0	49.4	59.1	68.8	78.8	88.8
44	13.0	22.0	31.1	40.5	50.0	59.8	69.6	79.7	89.9
45	13.1	22.2	31.5	40.9	50.6	60.4	70.4	80.6	90.9
46	13.3	22.5	31.8	41.4	51.1	61.1	71.2	81.5	91.9
47	13.4	22.7	32.2	41.8	51.7	61.8	72	82.4	92.1
48	13.6	23.0	32.5	42.3	52.2	62.4	72.7	83.2	93.8
49	13.7	23.2	32.8	42.7	52.8	63.1	73.5	84.1	94.8
50	13.9	23.4	33.2	43.1	53.3	63.7	74.2	85.0	95.8
Número de panelistas	Número de productos								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
55	14.5	24.6	34.8	45.2	55.9	66.8	77.9	89.1	100.5
60	15.2	25.7	36.3	47.3	58.4	69.8	81.3	93.1	104.9
65	15.8	26.7	37.8	49.2	60.8	72.6	84.6	96.9	109.2
70	16.4	27.7	39.2	51.0	63.1	75.4	87.8	100.5	113.3
80	17.5	29.6	42.0	54.6	67.4	80.6	93.9	107.5	121.2
90	18.6	31.4	44.5	57.9	71.5	85.5	99.6	114.0	128.5
100	19.6	33.1	46.9	61.0	75.4	90.1	105	120.1	135.5
110	20.6	34.8	49.2	64.0	79.1	94.5	110.1	126.0	142.1
120	21.5	36.3	51.4	66.8	82.6	98.7	115	131.6	148.4

Anexo L

Boleta de evaluación sensorial para salchicha tipo Bratwurst.

Boleta de evaluación sensorial

Prueba de aceptación y preferencia de salchicha tipo bratwurst

Nombre: _____ Fecha: _____

Instrucciones: Se le presentan 3 muestras de salchicha tipo bratwurst. Debe evaluar las muestras en el orden de izquierda a derecha. Antes y después de cada muestra debe tomar un sorbo de agua para limpiar su paladar. Indique el grado en que le gusta o disgusta los atributos de cada muestra de acuerdo con los puntajes del Cuadro No.1 anotando sus respuestas en el Cuadro No.2., las cuales deberá calificar de acuerdo con lo siguiente:

Cuadro No. 1. Escala hedónica

Categoría	Me disgusta extremadamente	Me disgusta mucho	Me disgusta moderadamente	Me disgusta levemente	No me gusta ni me disgusta	Me gusta levemente	Me gusta moderadamente	Me gusta mucho	Me gusta extremadamente
Puntaje	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Cuadro No. 2. Atributos a evaluar

No. de muestra	Apariencia	Color	Olor	Textura	Sabor	Aceptación general

Comentarios:

Preferencia por ordenamiento. De las tres muestras presentadas, ordénelas de acuerdo con su nivel de preferencia en una escala del 1 al 3. En donde (1) corresponde a la muestra más preferida y (3) a la muestra menos preferida.

Orden de preferencia	Valor	No. de muestra
Más preferida	1	
	2	
Menos preferida	3	