



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
LICENCIATURA EN QUÍMICA DE ALIMENTOS

TESIS

**DISEÑO DE UN ALIMENTO FUNCIONAL A PARTIR DE *Pleurotus*
*ostreatus***

Para obtener el título de
Licenciada en Química de Alimentos

PRESENTA

Karel Fernanda Angeles Salyano

Director (a)

Dra. Alma Delia Román Gutiérrez

Codirector (a)

Dra. Leticia Romero Bautista

Mineral de la Reforma, Hidalgo., México., Mayo 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 01 de julio de 2025

Número de control: ICBI-D/1193/2025

Asunto: Autorización de impresión.

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

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Química de Alimentos **Karel Fernanda Angeles Salyano**, quien presenta el trabajo de titulación "**Diseño de un alimento funcional a partir de *Pleurotus ostreatus***", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. Gabriela Marisol Vázquez Cuevas

Secretario: Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Vocal: Dra. Alma Delia Román Gutiérrez

Suplente: Dra. Leticia Romero Bautista

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

Dedico esta tesis. . .

Para las personas que más me aman y me han visto llevar este trabajo a cabo durante más de dos años, va dirigido a mis padres que me brindaron la oportunidad de estudiar la universidad y hoy por hoy titularme, gracias por su financiamiento, gracias por su apoyo moral, gracias por ser la parte de reconfortamiento para ayudarme a seguir y culminar cuando estuve cansada.

Carlos y Samira gracias por estar a mi lado a cada paso avanzado.

Para mi hermana mayor Karla que comprende todos los aspectos de esfuerzo y satisfacción de terminar un trabajo así, gracias por los consejos, aliento y sostenimiento en mis momentos entorpecidos, sin eso, no lo habría logrado.

Para mi maestra y amiga muy especial Anamaría que soy muy bendecida de tener en la vida, gracias por todas las palabras reconfortantes que me reintegran a saber quién soy y lo capaz que puedo ser, gracias por todo el conocimiento brindado.

Gracias a mi familia y amigos que apoyaron, preguntaron y se preocuparon por mis avances de tesis, gracias por estar pendientes, darme ánimos y estar felices por mí.

Dedicatoria especial para Dios que nunca me soltó para sostenerme en los momentos más duros y difíciles de comprender, la paz y consuelo hechas sentir estuvieron en las caídas, lo aprecio profundamente. Siempre Dios conmigo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, área académica de Química y Unidad de Laboratorios por el respaldo académico, técnico y humano brindado durante el desarrollo de esta investigación, así como por ser un espacio de formación y crecimiento profesional.

Agradezco a los doctores investigadores por ser la mayor fuente de información y respaldo de esta tesis, agradezco sus mentorías y consejos para facilitarme el trabajo, les agradezco todo el tiempo y paciencia brindados.

Gracias a los doctores y amigos fuera de los sinodales que brindaron algún conocimiento y en su momento fue bien aprovechado. Gracias por sus detalles pequeños pero que hicieron una diferencia.

Gracias al señor Arturo, maestro pulquero y del aguamiel que al conocer de mi investigación aportó todas las muestras de pulque de forma generosa y raudal, bendecido sea usted, su rancho y su trabajo.

Gracias al área de ciencias biológicas por ser una parte importante de formación y adopción dentro de su carrera y espacios, agradezco las muestras cultivadas, recolectadas que fueron la base de este trabajo.

Agradezco al laboratorio de alimentos por ser el espacio de experimentación por un largo tiempo, que siempre brindó la tecnología, reactivos y conocimiento académico.

Contenido	
Abstract	<u>¡Error! Marcador no definido.</u> 4
Resumen	2
Introducción	3
1. Antecedentes	5
1.1 Panificación en México y sus desafíos nutricionales.	5
1.2 Hongos comestibles y producción de <i>P. ostreatus</i>	6
1.3 Aprovechamiento de subproductos agroalimentarios en alimentos funcionales	10
1.4 Propiedades nutricionales y tecnológicas de <i>Pleurotus ostreatus</i>	12
1.5 El uso de fermentos tradicionales en panificación, implementación de pulque.	13
1.6 Sustitución parcial de harina de trigo por harinas no convencionales.	14
1.7 Métodos para estimar vida útil de productos panificados	15
1.8 Secado de alimentos	16
1.9 Innovaciones en panificados: harinas de hongo y fermentación alternativa.	18
1.10 Fermentos en la panificación	19
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo general	21
2.2 Objetivos específicos	21
3. Materiales y métodos	22
3.1 Esquema general del diseño experimental	22
3.2 Materias primas	22
3.3 Elaboración del pan	26
3.4 Análisis fisicoquímico y proximal	29
3.4.1 Determinación de humedad	29
3.4.2 Determinación de cenizas	30
3.4.3 Determinación de proteínas	31
3.5 Calidad del pan	31
3.5.1 Determinación del volumen del pan	32
3.5.2 Determinación de textura y color de miga	32
3.5.3 Determinación de color en pan	33
3.5.4 Actividad de agua en el pan	34

3.6 Estudio de vida útil	35
3.7 Análisis estadístico	37
4. Resultados y discusiones	39
4.1 Obtención de harina de <i>P. ostreatus</i> y análisis de su composición química	39
4.2 Caracterización física de panes testigo	41
4.3 Análisis de panes con sustitución de harina <i>P. ostreatus</i> alta concentración 3 a 7 %	45
4.4 Análisis de panes reducidos 1 a 3 % de <i>P. ostreatus</i> .	50
4.5 Análisis de la textura y color de la miga	53
4.6 Fórmulas seleccionadas	60
4.7 Vida útil	64
5. Conclusión	67
6. Anexos	68
6.1 Identificación y clasificación de mohos en los panes	68
6.2 Análisis cinético	72
7. Referencias	78

Índice de tablas

<u>Tabla 1.1: Aprovechamiento de remanentes y subproductos de la producción de hongos comestibles y sus aplicaciones potenciales</u>	<u>89</u>
<u>Tabla 1.2: Comparación de mermas postcosecha en especies <i>Pleurotus</i></u>	<u>1142</u>
<u>Tabla 3.1: Formulaciones experimentales para la elaboración de pan con sustitución parcial de harina de trigo por PO.</u>	<u>2829</u>
<u>Tabla 3.2: Ponderaciones para calidad de la miga</u>	<u>3334</u>
<u>Tabla 4.1: Composición proximal de la harina de PO.</u>	<u>4142</u>
<u>Tabla 4.2: Caracterización física de panes testigo (blancos).</u>	<u>4445</u>
<u>Tabla 4.3: Caracterización física y fisicoquímica de panes con PO 3 - 7</u>	<u>49</u>
<u>Tabla 4.4: Caracterización física y fisicoquímica de panes con PO 1-3</u>	<u>52</u>
<u>Tabla 4.5: Evaluación comparativa de la textura y el color de miga en panes formulados con y sin adición de PO.</u>	<u>55</u>
<u>Tabla 4.6: Análisis de parámetros físicos del pan seleccionado.</u>	<u>61</u>
<u>Tabla 4.7: Contenido de proteína (g) en panes seleccionados según formulación.</u>	<u>62</u>
<u>Tabla 4.8: Resumen de los parámetros cinéticos de deterioro en atributos de calidad del pan enriquecido con harina de PO.</u>	<u>66</u>
<u>Tabla A.1: Características observadas de mohos presentes en panes formulados con PO y su posible identificación morfológica.</u>	<u>70</u>
<u>Tabla A.2: Cuadro comparativo de los modelos para describir la evolución de la humedad frente al tiempo de almacenamiento y obtener la vida útil.</u>	<u>72</u>
<u>Tabla A.3: Cuadro comparativo de los modelos para describir la evolución de la AW frente al tiempo de almacenamiento para determinar la vida útil.</u>	<u>74</u>
<u>Tabla A.4: Cuadro comparativo de los modelos para describir la evolución del peso frente al tiempo de almacenamiento y obtener la vida útil.</u>	<u>76</u>

Indice de figuras

<u>Figura 1.1: Cuerpo fructífero de PO</u>	<u>78</u>
<u>Figura 3.1: Diagrama general de la experimentación.</u>	<u>2425</u>
<u>Figura 3.2: Muestras de hongo PO utilizadas en la experimentación</u>	<u>2526</u>

Lista de acrónimos

ASLT Accelerated Shelf-Life Testing

ANOVA Análisis de varianza

BAL bacterias ácido-lácticas

CIB Centro de Investigaciones Biológicas

LSD Least Significant Difference

ODS 12 Objetivos de Desarrollo Sostenible 12

Abstract

The deterioration of bread quality resulting from the partial replacement of wheat flour limits the incorporation of alternative ingredients with high nutritional value. This study aimed to evaluate the effect of adding *P. ostreatus* flour at various concentrations (1–7 %) and using different fermentation agents (pulque and commercial yeast) on the physicochemical, rheological, and shelf-life properties of bread, with the goal of developing functional formulations with an improved protein profile. Control and experimental breads were prepared following standard AACC and AOAC methods. Parameters such as moisture content, CIELAB color, texture, loaf volume, water activity, and protein content were measured. In addition, quality loss was modeled through deterioration kinetics. The partial substitution with *P. ostreatus* flour increased protein content up to 12.66 g/100 g in formulations fermented with pulque, although it gradually reduced loaf volume due to the diminished formation of gluten networks. Crust color shifted toward more intense reddish and yellowish tones (higher a^* and b^* values), associated with Maillard reactions and the contribution of proteins and phenolic compounds from the mushroom. Formulations with low *P. ostreatus* concentrations (1–3 %) maintained moisture and water activity within acceptable ranges, resulting in a shelf life comparable to that of traditional bread. Fermentation with pulque improved protein retention and sensory acceptability compared to yeast alone. These findings confirm that the incorporation of *P. ostreatus* flour is a viable strategy for nutritionally enhancing bread, provided that fermentation conditions, sugar content, and substitution ratio are optimized to balance technological functionality and sensory quality.

Resumen

El deterioro de la calidad del pan por sustitución parcial de harina de trigo limita la incorporación de ingredientes alternativos con alto valor nutricional. En este estudio se planteó evaluar el efecto de la adición de harina de *P. ostreatus* en diferentes concentraciones (1–7 %) y con distintos fermentos (pulque y levadura) sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y de vida útil del pan, con el fin de desarrollar formulaciones funcionales con mejor perfil proteico. Para ello se elaboraron panes testigo y experimentales siguiendo métodos estándar AACC y AOAC, se midieron parámetros como humedad, color CIELAB, textura, volumen, actividad de agua, y contenido de proteína, además de modelar la pérdida de calidad mediante cinética de deterioro. Se observó que la sustitución parcial con *P. ostreatus* incrementó el contenido proteico hasta 12.66 g/100 g en formulaciones fermentadas con pulque, aunque redujo gradualmente el volumen por la menor formación de redes de gluten. El color de la corteza se intensificó hacia tonalidades rojizas y amarillas (valores más altos de a^* y b^*), asociado a reacciones de Maillard y al aporte de proteínas y fenoles del hongo. Las formulaciones con bajas concentraciones de hongo (1-3 %) mantuvieron humedad y actividad de agua dentro de rangos aceptables, con una vida útil comparable al pan tradicional. La fermentación con pulque mejoró la retención proteica y la aceptabilidad sensorial frente a la levadura sola. Estos resultados confirman que es viable incorporar *P. ostreatus* para enriquecer nutricionalmente el pan, siempre que se optimicen la fermentación, el contenido de azúcar y la proporción de sustitución para equilibrar funcionalidad tecnológica y calidad sensorial.

Introducción

El pan es un alimento básico en múltiples culturas, pero su formulación tradicional basada en harina de trigo presenta limitaciones nutricionales, como bajo contenido proteico y deficiencias en aminoácidos esenciales. En los sistemas rurales dedicados al cultivo de *Pleurotus ostreatus*, una proporción considerable de la producción se pierde por defectos morfológicos, sobrecrecimiento o contaminación superficial, generando mermas que, si bien poseen valor nutricional, suelen descartarse sin ser aprovechadas. Este fenómeno representa un problema tanto ambiental como económico para los productores, y plantea interrogantes sobre las oportunidades de valorización de estos subproductos a través de su incorporación en alimentos de consumo habitual, como el pan blanco.

En los últimos años, ha crecido el interés por desarrollar panes funcionales enriquecidos con ingredientes alternativos que mejoren su perfil nutricional sin comprometer sus propiedades tecnológicas y sensoriales. Entre estos ingredientes, el hongo *Pleurotus ostreatus* destaca por su alto contenido de proteínas, fibra dietética y compuestos bioactivos con actividad antioxidante. Sin embargo, su incorporación en matrices panificadas plantea desafíos tecnológicos, ya que puede afectar la formación de la red de gluten, la retención de gases durante la fermentación y las características de textura y volumen del producto final.

Existe controversia en la literatura sobre los niveles óptimos de sustitución de harina de trigo por harinas no convencionales como la de *Pleurotus ostreatus*. Mientras algunos estudios reportan que sustituciones superiores al 10 % deterioran significativamente la calidad del pan, otros sugieren que con ajustes en la formulación y el proceso es posible incorporar hasta un 20 % sin afectar la aceptabilidad. Además, el tipo de fermento utilizado puede modular estos efectos, siendo los fermentos tradicionales como el pulque una alternativa prometedora por su microbiota diversa y capacidad para mejorar las propiedades reológicas de la masa. La interacción entre los componentes bioactivos del hongo, las propiedades fisicoquímicas del pan y las condiciones de almacenamiento constituye un campo

de interés aún poco explorado, especialmente en contextos de producción a pequeña escala o con enfoque sustentable.

Este trabajo se justifica por su enfoque integral en el aprovechamiento de subproductos con valor funcional, la evaluación de tecnologías fermentativas tradicionales y el desarrollo de metodologías para estimar la vida útil de un producto enriquecido. Su aporte se sitúa en la intersección entre el diseño de alimentos funcionales, la reducción de desperdicio agroalimentario y la generación de alternativas de valor agregado en comunidades rurales productoras de hongos comestibles. Los resultados pueden ser transferibles a otras matrices panificadas y contribuir al desarrollo de estrategias más sostenibles en el sector agroalimentario.

A partir de este análisis, se plantea como hipótesis que la incorporación parcial de harina obtenida de mermas de *Pleurotus ostreatus* en pan blanco, combinada con diferentes tipos de fermentos, mejora el perfil nutricional del producto sin afectar negativamente sus propiedades tecnológicas, y permite estimar una vida útil adecuada mediante análisis acelerado de estabilidad.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por harina de mermas de *Pleurotus ostreatus* (1-7 %), en combinación con diferentes fermentos (levadura comercial y pulque, sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas, nutricionales, y de vida útil del pan, con el fin de proponer un producto panificado enriquecido que aproveche subproductos agroalimentarios y promueva alternativas de valorización sustentable en el sector rural.

1. Antecedentes

1.1 Panificación en México y sus desafíos nutricionales.

La reformulación del pan blanco del pan blanco representa una vía concreta para mejorar la ingesta nutricional de amplios sectores de la población en México. La evidencia actual respalda la viabilidad tecnológica y sensorial de incorporar ingredientes alternativos que incrementen la densidad nutricional sin comprometer la aceptabilidad del producto (Coțovanu et al., 2023; Khan et al., 2023). Esto abre oportunidades para el desarrollo de productos dirigidos a segmentos específicos, como población infantil, adultos mayores o personas con necesidades dietéticas particulares, mediante el diseño de panes funcionales con propiedades específicas.

El aprovechamiento de harinas no convencionales, como las de leguminosas, pseudocereales y semillas, permite ampliar la gama de opciones tecnológicas en panificación. Estas alternativas pueden responder a demandas actuales relacionadas con el consumo de productos libres de gluten, ricos en fibra o con mayor contenido proteico (Peñalver et al., 2023; Wijewardhana et al., 2025). Además, su uso puede favorecer el desarrollo regional, al incentivar el cultivo y procesamiento de materias primas subutilizadas con potencial agroindustrial.

El interés creciente por productos con beneficios adicionales para la salud ha generado un entorno favorable para introducir innovaciones basadas en ingredientes funcionales. La incorporación de compuestos bioactivos, como los presentes en moringa, chía o quinoa, permite no solo enriquecer el contenido nutricional, sino también diferenciar comercialmente los productos (Khan et al., 2023; Sayed-Ahmad et al., 2018). En este contexto, el desarrollo de panes con propiedades antioxidantes o con efecto prebiótico puede alinearse con tendencias de consumo orientadas al bienestar integral.

La fermentación con masa madre representa una herramienta prometedora tanto por su contribución a la digestibilidad de los productos como por su potencial para mejorar la biodisponibilidad de nutrientes y extender la vida útil sin necesidad de aditivos sintéticos (Islam & Islam, 2024; Prieto-Vázquez Del Mercado et al., 2022).

Esto resulta especialmente relevante para aplicaciones en comunidades rurales o regiones con acceso limitado a productos frescos y nutritivos, donde la durabilidad y el valor nutricional son criterios clave.

Desde un enfoque de sostenibilidad, la reformulación del pan blanco también puede vincularse con estrategias de economía circular mediante el uso de subproductos agroindustriales ricos en fibra, proteínas o compuestos fenólicos. Este enfoque puede reducir el desperdicio de recursos y crear nuevas líneas de valor agregado en la industria alimentaria (Mir et al., 2023).

Finalmente, la aceptación progresiva por parte de los consumidores hacia productos integrales y funcionales indica que existe un espacio de mercado aún no saturado. El desafío radica en optimizar simultáneamente el perfil nutricional y las características sensoriales, sin aumentar de forma significativa los costos de producción, para asegurar la viabilidad comercial de estas innovaciones (Noor-us-Sana et al., 2024).

1.2 Hongos comestibles y producción de *P. ostreatus*

La producción de *P. ostreatus* bajo esquemas rurales representa una alternativa agroalimentaria viable y adaptable a contextos de bajos recursos. La versatilidad del hongo para crecer en una amplia variedad de sustratos lignocelulósicos permite su integración en sistemas agrícolas tradicionales mediante el aprovechamiento de subproductos agroindustriales como paja de maíz, bagazo de uva o subproductos forestales (Calderon Lopez et al., 2021; Romero Arenas et al., 2018). Esta estrategia contribuye al reciclaje de nutrientes y al cierre de ciclos productivos, alineándose con principios de economía circular y agricultura regenerativa. En la Figura 1.1 se muestran los cuerpos precosecha.



Figura 1.1: Cuerpo fructífero de *P. ostreatus*

La selección y formulación del sustrato influye directamente en el rendimiento biológico, la calidad nutricional y la composición química del cuerpo fructífero. Ajustes en la proporción de suplementos orgánicos han demostrado mejorar el contenido de proteína y fibra, así como elevar la presencia de compuestos bioactivos con potencial antioxidante (Effiong et al., 2024; Elkanah et al., 2022). Estos resultados abren la posibilidad de diseñar sistemas de cultivo orientados a la producción de alimentos funcionales o ingredientes nutraceuticos.

Desde una perspectiva productiva, la eficiencia del cultivo está determinada por la adaptabilidad de *P. ostreatus* a distintos subproductos orgánicos, lo que facilita su implementación en regiones con acceso limitado a insumos comerciales (Roblero-Mejía et al., 2021). La optimización de mezclas de sustrato, así como el control de variables como humedad, aireación y temperatura, permite maximizar el rendimiento sin requerir infraestructura sofisticada, favoreciendo su adopción por pequeños productores (Fornito et al., 2020; Mkhize et al., 2016).

Los subproductos postcosecha, comúnmente conocidos como sustratos agotados, constituyen un subproducto de valor que puede ser reincorporado en prácticas agrícolas locales como mejorador de suelos, suplemento alimenticio para animales o materia prima para compostaje (Haneef et al., 2017; Romero-Arenas et al., 2023). Su aprovechamiento contribuye a reducir la carga ambiental asociada a la disposición final de subproductos orgánicos y fortalece la resiliencia de los sistemas agroecológicos. En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de los subproductos y remanentes de los hongos.

Tabla 1.1: Aprovechamiento de remanentes y subproductos de la producción de hongos comestibles y sus aplicaciones potenciales

Tipo de remanente	Aprovechamiento	Productos/ Usos derivados	Referencias
Merma de cuerpos fructíferos	Alimentación humana.	Hamburguesas, sopas deshidratadas, snacks, harina proteica, patés.	(Royse et al., 2017; Sharma et al., 2021)
	Suplementos nutraceúticos	Cápsulas de β - glucanos, antioxidantes, tónicos inmuoestimulantes.	(Phan & Sabaratnam, 2012)
Sustrato agotado SMS	Producción de enzimas.	Lacasas, proteasas, celulasas por fermentación en estado sólido.	(Sharma et al., 2021)
	Abono y compostaje.	Fertilizante orgánico, enmienda para	(Phan & Sabaratnam, 2012;

Otros productos	Forraje para animales,	suelos agrícolas.	Sharma et al., 2021)
		Alimento ensilado para rumiantes, aves y peces.	(Royse et al., 2017)
	Biocombustibles,	Producción de bioetanol, biogás, briquetas.	(Phan & Sabaratnam, 2012)
	Biorremediación.	Tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos o metales pesados.	(Sharma et al., 2021)
	Bioconstrucción y embalaje.	Paneles aislantes, ladrillos, empaques de micelio.	(Royse et al., 2017)
	Textiles y papel.	(<i>myco-leather</i>), papel artesanal.	(Sharma et al., 2021)
	Cosméticos y farmacéuticos	Extractos con actividad antioxidante y antiinflamatoria	(Phan & Sabaratnam, 2012)

Además del impacto ambiental, el cultivo de *P. ostreatus* ofrece beneficios socioeconómicos al diversificar las fuentes de ingreso de comunidades rurales, especialmente en contextos donde la producción agrícola convencional enfrenta limitaciones estructurales o climáticas. La posibilidad de producir alimento con alto valor nutricional mediante el uso de materiales localmente disponibles convierte al hongo ostra en un componente estratégico para la seguridad alimentaria y el desarrollo rural ([Calderon Lopez et al., 2021](#)).

1.3 Aprovechamiento de subproductos agroalimentarios en alimentos funcionales.

La incorporación de subproductos agroalimentarios en la formulación de alimentos funcionales constituye una estrategia integral para la transición hacia sistemas alimentarios más sostenibles. Su aprovechamiento permite mitigar impactos ambientales, generar valor económico y promover beneficios sociales mediante prácticas de economía circular.

Desde la perspectiva ambiental, la transformación de residuos en ingredientes funcionales reduce las emisiones asociadas a su disposición y disminuye la presión sobre los recursos naturales. Este enfoque contribuye a cerrar ciclos de producción y consumo, alineándose con las metas planteadas en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 (ODS 12) (Zhang & Zhang, 2024).

La reducción de la huella ecológica derivada de una adecuada gestión de subproductos también incide en la sostenibilidad de otras actividades agrícolas y agroindustriales (Salemdeeb et al., 2017). El potencial funcional de estos materiales ha sido aprovechado en diversos productos, particularmente en matrices de panificación, donde la incorporación de compuestos fenólicos provenientes de residuos ha permitido mejorar la calidad nutricional sin comprometer la aceptabilidad sensorial (Melini et al., 2020). Este enfoque resalta el valor agregado que puede obtenerse de materiales previamente considerados desecho, ampliando las posibilidades de innovación en el diseño de alimentos con propiedades bioactivas. En la Tabla 1.2 se presenta un resumen de los porcentajes de pérdidas en sistemas productores de especies *Pleurotus*.

Tabla 1.12: Comparación de mermas postcosecha en especies *Pleurotus*.

Especie	Merma estima (%)	Causas principales	Referencias
<i>Pleurotus</i> spp (Promedio optimo)	10-30	Criterios comerciales, daño leve, deshidratación	(Mata & Savoie, 2012; Naher et al., 2024a)
<i>Pleurotus sajor-caju</i>	30-35	Perdida de humedad deterioro rápido postcosecha	(Naher et al., 2024 ^a)
<i>Agaricus ostreatus</i> (En Ghana)	40-60	Falta de cadena de frío, manipulación rustica.	(Ampofo., 2014)
<i>Agaricus bisporus</i> (Mercado europeo)	5-15	Descarte por calidad visual, manejo mecanizado	(Royse et al., 2017)

En el ámbito social, la valorización de residuos alimentarios fortalece iniciativas orientadas a mejorar la seguridad alimentaria y reducir las desigualdades en el acceso a alimentos. Mecanismos como los bancos de alimentos y los programas educativos sobre gestión de residuos promueven prácticas más responsables tanto en consumidores como en productores, con impacto positivo en la salud pública y la conciencia ambiental (Adam et al., 2022; Penalver & Aldaya, 2022; Purwanto et al., 2023). El aprovechamiento de subproductos también representa una vía económica viable para reducir costos operativos y generar nuevas oportunidades de negocio. La implementación de estrategias de valorización permite disminuir los gastos asociados a la eliminación de residuos, al tiempo que estimula el desarrollo de tecnologías para la obtención de ingredientes de alto valor añadido (Orr & Goossens, 2024; Prokic et al., 2022). Esto favorece la

resiliencia de las industrias agroalimentarias ante fluctuaciones del mercado y restricciones en el uso de recursos primarios.

Este enfoque, que integra sostenibilidad ambiental, utilidad funcional, impacto social y viabilidad económica, plantea un modelo productivo coherente con las exigencias contemporáneas en materia de alimentación, salud y medio ambiente.

1.4 Propiedades nutricionales y tecnológicas de *Pleurotus ostreatus*

P. ostreatus presenta un perfil nutricional compatible con las tendencias actuales de alimentación saludable, dada su elevada proporción de proteínas y fibras, junto con un bajo contenido de grasa ([Chamutpong et al., 2019](#)). Esta composición permite su inclusión en dietas balanceadas y sugiere aplicaciones potenciales en productos dirigidos a poblaciones con requerimientos específicos, como personas con obesidad o enfermedades metabólicas.

El contenido de fibra en *P. ostreatus*, además de su efecto sobre la saciedad, contribuye al mantenimiento de una microbiota intestinal saludable, lo que puede relacionarse con una mejor regulación del metabolismo energético ([Torres-Martínez et al., 2023](#)). Su capacidad antioxidante, asociada a compuestos fenólicos, flavonoides y polisacáridos, aporta beneficios complementarios que refuerzan su valor como alimento funcional ([Galappaththi et al., 2021](#); [Törös et al., 2023](#)).

Desde una perspectiva tecnofuncional, la incorporación de harina de *P. ostreatus* en matrices alimentarias puede modificar propiedades clave como la textura, la capacidad de retención de agua y la estabilidad estructural del producto final ([Torres-Martínez et al., 2023](#)). Estas características permiten optimizar formulaciones sin la necesidad de recurrir a aditivos artificiales. La baja actividad de agua de la seta deshidratada reduce la incidencia de deterioro microbiológico, lo que mejora su manejo postcosecha y extiende su vida útil ([Effiong et al., 2024](#)).

El uso de sustratos no convencionales en su cultivo ha mostrado ser una vía efectiva para incrementar su calidad nutricional y funcional. La inclusión de residuos agroindustriales como sustrato incrementa el contenido de metabolitos bioactivos en los cuerpos fructíferos, lo cual no solo potencia su valor como alimento funcional, sino que establece un vínculo directo con prácticas sostenibles en la producción de alimentos ([Torres-Martínez et al., 2024](#)).

En conjunto, estas investigaciones posicionan a *P. ostreatus* como un ingrediente con potencial en el diseño de alimentos que conjugan funcionalidad nutricional, estabilidad tecnológica y sostenibilidad productiva.

1.5 El uso de fermentos tradicionales en panificación, implementación de pulque.

El uso de pulque como fermento en panificación introduce una microbiota diversa con potencial funcional y tecnológico. Su contenido de bacterias lácticas y levaduras influye directamente en la fermentación, modulando la formación de compuestos que afectan textura, aroma y digestibilidad del pan ([Huezo-Sánchez et al., 2023](#); [Pérez-Alvarado et al., 2022](#)). Este tipo de fermentación mixta guarda similitud con sistemas como la masa madre, donde la sinergia microbiana aporta beneficios tanto sensoriales como estructurales.

El metabolismo microbiano presente en el pulque genera ácidos y enzimas capaces de modificar macromoléculas como proteínas y almidones durante la fermentación, lo que puede traducirse en una miga más porosa y suave, así como en un perfil de sabor más complejo ([Gao et al., 2022](#)). Estas transformaciones en la matriz del pan sugieren aplicaciones en productos con valor agregado, especialmente en formulaciones que buscan una textura diferenciada sin el uso de aditivos sintéticos.

Además del impacto tecnológico, el uso de pulque introduce una dimensión nutricional vinculada al potencial probiótico de sus microorganismos. La

presencia de bacterias beneficiosas podría contribuir a una mejora en la salud intestinal del consumidor, alineándose con tendencias que priorizan la funcionalidad de los alimentos fermentados (Giles-Gómez et al., 2024). Este efecto ha sido previamente observado con otros fermentos tradicionales, en los que la inclusión microbiana no solo favorece la digestibilidad, sino que también incrementa el contenido de compuestos bioactivos (Huang et al., 2020). La integración del pulque en la panificación puede, por tanto, abrir nuevas posibilidades en el desarrollo de productos diferenciados que combinan tradición, funcionalidad y calidad tecnológica, ampliando el espectro de aplicaciones de los fermentos ancestrales en la innovación alimentaria contemporánea.

1.6 Sustitución parcial de harina de trigo por harinas no convencionales.

La sustitución parcial de harina de trigo por harinas no convencionales ha mostrado efectos diferenciados sobre las propiedades tecnológicas y sensoriales del pan. El impacto sobre la textura se ha relacionado con la reducción del módulo elástico y del valor de esfuerzo en mezclas con harinas como la de amaranto, lo cual favorece una miga más suave y con menor retrogradación de almidón (Mykolenko et al., 2023). Esta modificación mecánica se atribuye a la capacidad de absorción de agua de los almidones no convencionales, como se ha observado en formulaciones con amaranto y chía, donde el aumento del contenido de humedad contribuye a una mayor suavidad y retención de frescura (Nasir et al., 2020; Sayed-Ahmad et al., 2018). El contenido de humedad también ha sido influido por almidones modificados y fibras solubles, los cuales promueven una mayor retención de agua en la miga, como ocurre con mezclas que incorporan almidón de yuca o harinas ricas en fibra dietética (Rodríguez-Sandoval et al., 2017). Este comportamiento no solo afecta la textura, sino también la vida útil del pan, dada la relación entre humedad y percepción de frescura.

Respecto al volumen, los efectos dependen de la naturaleza del sustituto y su proporción. Mientras algunas formulaciones, como aquellas con sorgo al 10 %, mantienen un volumen aceptable ([Ari Akin & Miller, 2017](#)), otras como las que incluyen avena en proporciones elevadas presentan disminuciones tanto en volumen como en textura, probablemente por la interferencia con la red de gluten ([He et al., 2023](#)). Esta variabilidad sugiere que la funcionalidad tecnológica de cada harina alternativa debe evaluarse individualmente, considerando su efecto sobre la estructura de la masa y la capacidad de retención de gases. Los atributos sensoriales son igualmente determinantes. Harinas como las de amaranto y quinua aportan perfiles de sabor particulares que pueden ser percibidos de manera ambivalente por los consumidores ([Alencar et al., 2017](#); [Moss & McSweeney, 2022](#)). Aunque estas harinas contribuyen a mejorar el perfil nutricional del pan, su impacto sensorial requiere ajustes en la formulación para mantener o mejorar la aceptabilidad. Las investigaciones consultadas muestran que la sustitución parcial de harina de trigo por ingredientes no convencionales implica una interacción compleja entre propiedades funcionales, tecnológicas y sensoriales. La elección del tipo y proporción de sustitución debe considerar tanto la funcionalidad estructural como la respuesta del consumidor, a fin de lograr un equilibrio entre innovación y aceptación.

1.7 Métodos para estimar vida útil de productos panificados

La aplicación de métodos acelerados para estimar la vida útil en productos panificados permite modelar la pérdida de calidad bajo condiciones controladas, optimizando el tiempo requerido para evaluar su durabilidad. El enfoque Accelerated Shelf-Life Testing ([ASLT](#)) ha demostrado ser útil en productos con alta actividad de agua, como el pan, al permitir observar en menor tiempo los cambios fisicoquímicos y microbiológicos que ocurren durante el almacenamiento convencional ([Alpers et al., 2021](#)). Este enfoque proporciona un marco útil para estudiar procesos como el endurecimiento de la miga, la pérdida de humedad y la susceptibilidad al deterioro microbiano.

La ecuación de Arrhenius, empleada como modelo cinético en este contexto, permite calcular constantes de velocidad a diferentes temperaturas, facilitando la predicción de la vida útil en función del comportamiento térmico de los indicadores de calidad ([Dharma et al., 2023](#); [Nugraha et al., 2022](#)). Su uso proporciona un respaldo matemático al comportamiento de parámetros clave, como la firmeza o la pérdida de humedad, y permite establecer fechas de caducidad con base en evidencia cuantitativa.

La identificación de indicadores de calidad relevantes bajo condiciones aceleradas mejora la confiabilidad de las predicciones. El monitoreo de variables químicas y físicas ha permitido generar modelos que reproducen de manera robusta los cambios asociados al deterioro del pan en diferentes ambientes de almacenamiento ([Syska et al., 2023](#)). Esta metodología no solo optimiza la gestión del tiempo y los recursos en la industria panadera, sino que también contribuye a reducir mermas y garantizar una experiencia de consumo constante.

Por otro lado, los resultados de las pruebas aceleradas de vida útil pueden informar decisiones de reformulación. La inclusión de ingredientes funcionales, como los alcoholes de azúcar, ha demostrado ralentizar el proceso de envejecimiento del pan al modificar la estructura de la miga y limitar la retrogradación del almidón ([Samakradhamrongthai et al., 2023](#)). Estas estrategias, evaluadas a través de modelos cinéticos, permiten desarrollar productos con mayor estabilidad sin comprometer su aceptabilidad sensorial.

1.8 Secado de alimentos

Diversos estudios han evidenciado que el método de secado empleado influye directamente en la retención de compuestos bioactivos y propiedades funcionales en *P. ostreatus*. Entre los parámetros más sensibles se encuentran la actividad antioxidante, el contenido proteico y las

características sensoriales, aspectos relevantes para su aprovechamiento como ingrediente en alimentos funcionales.

Los cambios fisicoquímicos derivados del secado afectan la composición antioxidante del hongo. Se ha observado que técnicas como el secado por aire caliente, liofilización y microondas generan resultados diferenciados en la conservación de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de los extractos.

Por ejemplo, se ha reportado que los métodos aplicados alteran la porosidad estructural y, con ello, la liberación de compuestos fenólicos responsables de la actividad antioxidante ([Piskov et al., 2020](#); [Villalobos-Pezos et al., 2024](#)). En *P. ostreatus*, estas variaciones repercuten en el potencial del hongo para actuar como agente antioxidante en aplicaciones alimentarias. Asimismo, se ha documentado que los extractos de este hongo, una vez deshidratado, mantienen una actividad antioxidante considerable, lo que refuerza su utilidad para mitigar procesos de estrés oxidativo en el organismo ([Omale et al., 2020](#); [Rahimah et al., 2019](#)).

La apariencia del producto deshidratado también se ve condicionada por el tipo de secado. Se ha identificado que el secado en gabinete térmico conserva mejor el color del hongo, mientras que el secado por microondas tiende a intensificar el pardeamiento, afectando negativamente su calidad visual y aceptación sensorial ([Siti-Nuramira et al., 2022](#)). Estos cambios están relacionados con reacciones de pardeamiento no enzimático inducidas por altas temperaturas o exposición directa a radiación.

El contenido proteico, por otro lado, puede modificarse a partir de la desnaturalización parcial y la liberación de aminoácidos libres durante el secado, fenómeno que favorece la digestibilidad y la aplicación del hongo como fuente proteica complementaria ([Gashaw & Getu, 2020](#)). Además, se ha señalado que la composición química de *P. ostreatus* es rica en proteínas,

fibra dietética y minerales esenciales, lo que refuerza su valor como ingrediente funcional en formulaciones panificadas ([Tripathy & Nayak, 2022](#)).

Estas publicaciones indican que el secado no puede considerarse una etapa neutra, sino una operación que condiciona la calidad funcional del ingrediente fúngico. Evaluar su impacto permite seleccionar condiciones que maximicen la conservación de compuestos bioactivos, optimizando su aplicación tecnológica en productos que demandan estabilidad nutricional, como los panes funcionales.

1.9 Innovaciones en panificados: harinas de hongo y fermentación alternativa.

Diversos estudios han evidenciado que el método de secado empleado influye directamente en la retención de compuestos bioactivos y propiedades funcionales en *P. ostreatus*. Entre los parámetros más sensibles se encuentran la actividad antioxidante, el contenido proteico y las características sensoriales, aspectos relevantes para su aprovechamiento como ingrediente en alimentos funcionales.

Los cambios fisicoquímicos derivados del secado afectan la composición antioxidante del hongo. Se ha observado que técnicas como el secado por aire caliente, liofilización y microondas generan resultados diferenciados en la conservación de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de los extractos. Por ejemplo, se ha reportado que los métodos aplicados alteran la porosidad estructural y, con ello, la liberación de compuestos fenólicos responsables de la actividad antioxidante ([Piskov et al., 2020](#); [Villalobos-Pezos et al., 2024](#)). En *P. ostreatus*, estas variaciones repercuten en el potencial del hongo para actuar como agente antioxidante en aplicaciones alimentarias. Asimismo, se ha documentado que los extractos de este hongo, una vez deshidratado, mantienen una actividad antioxidante considerable, lo que refuerza su utilidad para mitigar procesos de estrés oxidativo en el organismo ([Omale et al., 2020](#); [Rahimah et al., 2019](#)).

La apariencia del producto deshidratado también se ve condicionada por el tipo de secado. Se ha identificado que el secado en gabinete térmico conserva mejor el color del hongo, mientras que el secado por microondas tiende a intensificar el pardeamiento, afectando negativamente su calidad visual y aceptación sensorial (Siti- Nuramira et al., 2022). Estos cambios están relacionados con reacciones de pardeamiento no enzimático inducidas por altas temperaturas o exposición directa a radiación.

El contenido proteico, por otro lado, puede modificarse a partir de la desnaturalización parcial y la liberación de aminoácidos libres durante el secado, fenómeno que favorece la digestibilidad y la aplicación del hongo como fuente proteica complementaria (Gashaw & Getu, 2020). Además, se ha señalado que la composición química del hongo que es rica en proteínas, fibra dietética y minerales esenciales, lo que refuerza su valor como ingrediente funcional en formulaciones panificadas (Tripathy & Nayak, 2022).

Estas publicaciones indican que el secado no puede considerarse una etapa neutra, sino una operación que condiciona la calidad funcional del ingrediente fúngico. Evaluar su impacto permite seleccionar condiciones que maximicen la conservación de compuestos bioactivos, optimizando su aplicación tecnológica en productos que demandan estabilidad nutricional, como los panes funcionales.

1.10 Fermentos en la panificación

El aprovechamiento de consorcios microbianos derivados de alimentos fermentados tradicionales como el pulque constituye una estrategia viable para el desarrollo de cultivos iniciadores aplicables a procesos de fermentación tipo masa madre. La microbiota del pulque, compuesta principalmente por bacterias ácido-lácticas (BAL) y levaduras, presenta propiedades tecnológicas asociadas con mejoras en la calidad de productos horneados. Cepas de *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus brevis* y *Pediococcus acidilactici*, aisladas de matrices no lácteas, han mostrado capacidad para acidificar el medio, inhibir microorganismos no deseados a

través de la producción de ácidos orgánicos y bacteriocinas, y modificar la estructura de la masa, incidiendo en su comportamiento reológico y textura final ([Calabrese et al., 2022](#); [Petkova et al., 2021](#)).

Levaduras de los géneros *Saccharomyces* y *Kazachstania*, comunes en fermentaciones tradicionales y masas madre, participan en la producción de dióxido de carbono, favoreciendo la formación del alveolado característico del pan. La interacción sinérgica entre BAL y levaduras contribuye a la estabilidad del ecosistema fermentativo, a la generación de compuestos volátiles y a la extensión de la vida útil del producto ([Landis et al., 2021](#); [Minervini et al., 2018](#)). Replicar esta simbiosis con comunidades del pulque podría diversificar el perfil funcional de fermentaciones panarias.

Investigaciones recientes han demostrado que cepas microbianas de origen extraharina se adaptan a matrices basadas en cereales, aspecto relevante en el desarrollo de productos sin gluten o formulados con harinas no convencionales ([Bender et al., 2018](#); [Turksoy et al., 2024](#)). La incorporación de BAL y levaduras provenientes del pulque permite preservar prácticas fermentativas tradicionales, al tiempo que posibilita el diseño de cultivos iniciadores autóctonos con aplicaciones en panificación artesanal e industrial ([losca et al., 2020](#)).

La eficacia de estos consorcios depende de variables como el tipo de harina, la proporción agua-harina o la temperatura de fermentación, las cuales inciden en la dinámica microbiana y, en consecuencia, en la reproducibilidad y estabilidad del proceso ([Boreczek et al., 2020](#); [Roby et al., 2020](#)). La caracterización sistemática del ecosistema microbiano del pulque amplía el repertorio de cepas con potencial biotecnológico para panificación y contribuye a revalorizar fermentaciones tradicionales mediante su integración en modelos de producción alimentaria más diversos y sostenibles.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por harina de mermas de *Pleurotus ostreatus*, en combinación con diferentes tipos de fermentos (levadura, pulque o ambos), en la elaboración de pan blanco, mediante el análisis de atributos fisicoquímicos de calidad y parámetros nutricionales, con el fin de proponer un producto panificado enriquecido que aproveche subproductos agroalimentarios y promueva alternativas de valorización sustentable en el sector rural.

2.2 Objetivos específicos

1. Obtener harina a partir de mermas de *Pleurotus ostreatus* mediante secado solar, molienda y tamizado, y caracterizarla fisicoquímicamente mediante análisis de humedad y contenido de cenizas, con el propósito de evaluar su viabilidad como ingrediente funcional en panificación.
2. Formular y elaborar panes blancos con distintas concentraciones de harina de *Pleurotus ostreatus*, empleando fermentos de levadura, pulque o ambos, para analizar su efecto sobre la calidad fisicoquímica del pan, incluyendo humedad, volumen, textura, color y contenido de proteína.
3. Realizar pruebas aceleradas de vida útil con el pan enriquecido seleccionado, mediante el almacenamiento a diferentes temperaturas controladas, con el fin de determinar el atributo crítico de calidad.

3. Materiales y métodos

3.1 Esquema general del diseño experimental

El desarrollo de este trabajo se estructuró en etapas secuenciales que integran la obtención y procesamiento del hongo *P. ostreatus*, la formulación de panes enriquecidos y el análisis de su calidad fisicoquímica, tecnológica y de vida útil. En la Figura 3.1 se presenta un diagrama que sintetiza el flujo metodológico aplicado. El proceso inició con la recolección del hongo en condiciones controladas, seguido por su secado solar, molienda y tamizado para obtener un polvo homogéneo. Posteriormente, se elaboraron formulaciones preliminares de pan con diferentes porcentajes de sustitución y se evaluaron de forma comparativa los efectos de distintos fermentos, incluyendo levadura comercial, pulque y combinaciones de ambos. Estos ensayos se seleccionaron formulaciones con niveles de sustitución de 1 % a 7 %, que fueron analizadas en términos de calidad fisicoquímica, contenido proteico y estabilidad durante el almacenamiento. Esta estructura metodológica permitió integrar la evaluación de parámetros nutricionales, tecnológicos y de deterioro cinético para valorar la viabilidad de enriquecer pan blanco con harina de *P. ostreatus*.

3.2 Materias primas

El hongo *P. ostreatus* empleado en las formulaciones experimentales fue proporcionado por la Dra. Leticia Romero Bautista. Los ejemplares fueron cultivados en el invernadero del Centro de Investigaciones Biológicas (CIB) en condiciones controladas para asegurar su calidad microbiológica y un perfil nutricional estable. Una vez recolectado, el material fresco se sometió a un proceso de secado solar prolongado. El recipiente con las setas fue colocado en el interior del secadero, protegiéndolo de lluvias y de cualquier factor que pudiera provocar rehidratación. Este proceso se mantuvo durante un periodo de un mes y veinte días, obteniéndose finalmente un peso total

de 470 g, como se muestra en la Figura 3.2 (Enríquez Pico et al., 2023; González, 2024).

Con un contenido de humedad inferior al 10 %, se procedió a la molienda utilizando una licuadora industrial Waring Commercial, Laboratory Blender, realizando cuatro ciclos de molienda y remolienda para optimizar la obtención de polvo fino. Posteriormente, el material fue tamizado con mallas de 500 μm y 425 μm para asegurar una granulometría homogénea. El peso final de hongo molido fue de 406.3 g, registrándose mermas de 24.9 g y 9.7 g en cada tamiz, respectivamente, conforme al método AOAC 28 para tamizado y eliminación de materia objetable.

Para la elaboración de los panes se utilizaron como materias primas harina de trigo comercial, azúcar refinada, grasa vegetal, sal de mesa, agua potable y pulque fresco como fermento alternativo. La levadura panadera seca activa se empleó en las formulaciones control y combinadas. Todos los ingredientes se pesaron con precisión en una balanza analítica (± 0.01 g) antes de su incorporación a la masa. A continuación, se muestra el esquema de elaboración.

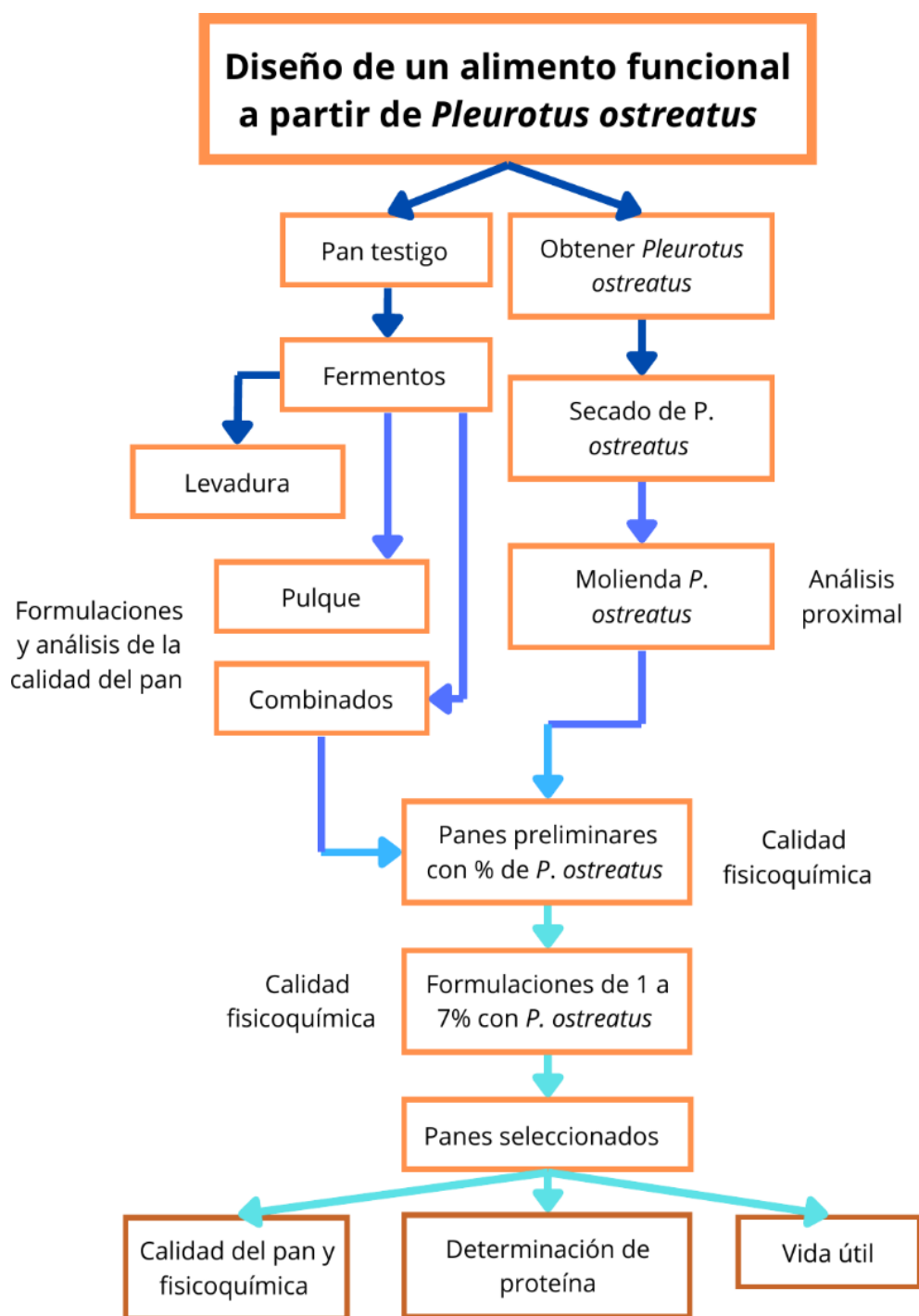


Figura 3.1: Diagrama general de la experimentación.



Figura 3.2: Muestras de hongo *P. ostreatus* utilizadas en la experimentación

3.3 Elaboración del pan

La preparación de las formulaciones inició con la mezcla de los ingredientes secos, harina, azúcar y sal, para asegurar su distribución uniforme antes del amasado. La levadura se hidrató y activó previamente en agua a temperatura ambiente para favorecer su incorporación. Posteriormente, se integraron gradualmente los ingredientes líquidos, que incluyeron agua, pulque y grasa vegetal previamente calentada para facilitar su emulsión. Todo el proceso se realizó manualmente en un contenedor de acero inoxidable, trabajando la masa hasta obtener una estructura homogénea y tersa, libre de grumos o partículas secas visibles, garantizando una hidratación uniforme de la harina ([Bredariol & Vanin, 2022](#); [Mellado & Haros, 2016](#)).

La masa reposó en dos etapas de fermentación controlada. La primera fermentación se realizó en cámara a 30 °C y 85 % de humedad relativa durante un periodo de 1 a 2 horas, permitiendo el desarrollo del gas carbónico y la formación de la red de gluten. Concluido este tiempo, se procedió a un desgasificado ligero mediante un amasado breve, que redistribuyó las burbujas en la masa y homogeneizó su estructura. Se pesaron porciones de masa entre 179 g y 191 g según la formulación, dividiéndose en tres muestras para obtener triplicados de cada tratamiento. Las porciones se colocaron en moldes de acero inoxidable previamente engrasados con dimensiones de 7 × 12 × 7 cm. Para optimizar la segunda fermentación, los moldes se resguardaron en bolsas plásticas, evitando corrientes de aire y reduciendo la pérdida de humedad.

Al completar el tiempo de fermentación secundaria, se precalentó el horno a 200 °C para asegurar una temperatura estable durante el horneado. Los moldes se introdujeron cuidadosamente para no colapsar la capa superficial inflada de la masa. El horneado se mantuvo durante 20 minutos a la misma temperatura de precalentado. Una vez finalizada la cocción, los panes fueron desmoldados con precaución, enfriados a temperatura

ambiente y posteriormente pesados para registrar las pérdidas de humedad y rendimiento. Todo el procedimiento se llevó a cabo conforme a los lineamientos establecidos por el método AACC (2000) (Bredariol & Vanin, 2022; Mellado & Haros, 2016).

Las formulaciones de cada tratamiento se diseñaron considerando la sustitución parcial de harina de trigo por diferentes porcentajes de *Pleurotus ostreatus*, así como la variación en el tipo de fermento utilizado, levadura, pulque o combinaciones de ambos. La Tabla 3.1 resume los códigos de identificación, proporciones de cada ingrediente y el porcentaje de sustitución de hongo empleado. Este esquema permitió evaluar la influencia de cada variable en la calidad fisicoquímica, la textura, el volumen y la vida útil de los panes elaborados.

Los primeros tratamientos corresponden a las formulaciones control sin sustitución de hongo, variando únicamente en el fermento empleado. El tratamiento **B1** es el testigo absoluto, sin adición de fermento; **BL2** incorpora exclusivamente levadura; **B31** emplea únicamente pulque, mientras que **B41** y **B5** combinan levadura y pulque, modificando además la cantidad de azúcar para observar su efecto sobre la fermentación y las propiedades del pan.

Los tratamientos **P7**, **P5** y **P3** representan panes enriquecidos con *P. ostreatus* en niveles de 7 %, 5 % y 3 %, elaborados con levadura y pulque de manera simultánea, además de un mayor aporte de azúcar para favorecer la actividad fermentativa. En contraste, los códigos **P78**, **P58** y **P38** mantienen los mismos porcentajes de sustitución, pero con menor cantidad de azúcar, permitiendo comparar la influencia de este componente en las características finales del pan.

De forma adicional, los tratamientos **F1**, **F2** y **F3** incluyen sustituciones de 1 %, 2 % y 3 % de hongo, empleando solo pulque como fermento principal, mientras que **L1**, **L2** y **L3** presentan las mismas proporciones de sustitución,

pero fermentan únicamente con levadura y mayor volumen de agua, sin añadir pulque.

Todas las formulaciones mantienen cantidades precisas de harina, agua, levadura, pulque, azúcar y hongo, expresadas en gramos o mililitros según corresponda, garantizando una masa con consistencia homogénea y comparabilidad entre tratamientos. Esta estructura experimental permite analizar de forma sistemática cómo el tipo de fermento, el nivel de sustitución de *P. ostreatus* y el contenido de azúcar inciden en las propiedades fisicoquímicas, sensoriales y tecnológicas del pan.

Tabla 3.1: Formulaciones experimentales para la elaboración de pan con sustitución parcial de harina de trigo por *P. ostreatus*.

Tratamiento	Código	Harina (g)	Agua (mL)	Levadura (g)	Pulque (mL)	Azúcar (g)	PO (g)
Testigo	B1	100	66	0	0	8	0
Levadura	BL2	100	66	3	0	8	0
Pulque	B31	100	41	0	25	8	0
Levadura + pulque	B41	100	41	3	25	8	0
Levadura + pulque	B5	100	41	3	25	16	0
Levadura + pulque + PO 7 %	P7	93	41	3	25	16	7
Levadura + pulque + PO 5 %	P5	95	41	3	25	16	5
Levadura + pulque + PO 3 %	P3	97	41	3	25	16	3
Levadura + pulque + PO 7 %	P78	93	41	3	25	8	7
Levadura + pulque + PO 5 %	P58	95	41	3	25	8	5
Levadura + pulque + PO 3 %	P38	97	41	3	25	8	3
Pulque + PO 1 %	F1	99	41	3	25	8	1
Pulque + PO 2 %	F2	98	41	3	25	8	2
Pulque + PO 3 %	F3	97	41	3	25	8	3
Levadura + PO 1 %	L1	99	66	3	0	8	1
Levadura + PO 2	L2	98	66	3	0	8	2

%								
Levadura + PO 3	L3	97	66	3	0	8	3	
%								

PO: *Pleurotus ostreatus*

1.1.1.

3.4 Análisis fisicoquímico y proximal

3.4.1 Determinación de humedad

El contenido de humedad del hongo *P. ostreatus* se determinó empleando una termobalanza analítica Ohaus MB45. Para garantizar la representatividad de la muestra, se tomaron porciones de diferentes zonas del lote total, trabajando por triplicado. De cada muestra se pesaron entre 0.6 g y 0.7 g, colocándolas en la termobalanza hasta que el equipo alcanzó un peso constante. Este análisis permitió verificar que el hongo presentara menos del 10 % de humedad antes de proceder a la molienda.

Para las harinas de panificación se utilizaron cuatro muestras. Cada muestra se colocó en crisoles previamente estabilizados a peso constante, los cuales se mantuvieron 16 horas en estufa para la etapa de deshidratación primaria. Después, los crisoles se enfriaron en desecador y se pesaron para registrar la pérdida de humedad. Posteriormente, se pesaron entre 1 g y 2 g de harina para la determinación de cenizas, llevándolos a mufla a 590 °C durante cuatro horas. Tras el enfriamiento en desecador por 30 min, se obtuvieron los pesos finales para calcular el porcentaje de cenizas. Este procedimiento se basó en métodos oficiales AOAC 14.006-008, ISO 2171 y AACC 08-12.

El peso inicial correspondió a la muestra fresca, ya fuera hongo o harina, mientras que el peso final se obtuvo tras el secado controlado en la termobalanza o en estufa hasta alcanzar peso constante. Con estos valores se calculó el porcentaje de humedad mediante la Ecuación 3.1, expresando la cantidad de agua eliminada en relación con el peso original. Este procedimiento permitió verificar que el *Pleurotus ostreatus* presentara un contenido de humedad inferior al 10 %, requisito necesario para proceder a su molienda y posterior incorporación en las formulaciones experimentales.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

- P_i = peso inicial de la muestra antes del secado (g).
- P_f = peso final de la muestra después del secado hasta peso constante (g).

3.4.2 Determinación de cenizas

Para determinar el contenido de cenizas, se pesaron entre 1 g y 2 g de harina y se colocaron en crisoles previamente estabilizados a peso constante. Las muestras se incineraron en una mufla a 590 °C durante cuatro horas para eliminar toda la materia orgánica. Finalizado el tiempo, los crisoles se enfriaron en un desecador por 30 min para evitar la reabsorción de humedad ambiental y se registró el peso final. Este procedimiento permitió cuantificar el residuo mineral inorgánico presente en la muestra. El análisis se realizó en cuadruplicado para garantizar la reproducibilidad, siguiendo los métodos oficiales AOAC 14.006-008, ISO 2171 y AACC 08-12. El peso inicial correspondió a la muestra seca antes de la incineración, mientras que el peso final representó únicamente la fracción mineral remanente tras la calcinación. Con estos valores se calculó el porcentaje de cenizas mediante la Ecuación 3.2, expresando la cantidad de residuo inorgánico en relación con el peso original de la muestra. Este análisis permitió conocer el contenido mineral de la harina utilizada para las formulaciones experimentales.

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{P_f}{P_m} \times 100 \quad (3.2)$$

Donde:

- P_f = peso del residuo inorgánico tras la incineración (g).
- P_m = peso de la muestra seca antes de la incineración (g).

3.4.3 Determinación de proteínas

La cuantificación de proteína bruta se realizó mediante el método Kjeldahl, siguiendo el protocolo AOAC (2000) con ligeras adaptaciones. Este método se fundamenta en la destrucción oxidativa de la materia orgánica mediante digestión con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 , J.T. Baker), liberando el nitrógeno orgánico en forma de amoníaco (NH_3). El amoníaco liberado fue retenido como bisulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Posteriormente, se realizó la destilación alcalina para liberar el amoníaco, el cual se capturó en una solución estándar y se cuantificó mediante titulación.

Con los resultados obtenidos, la proteína bruta se calculó mediante la Ecuación 3.3, aplicando el factor de conversión correspondiente según el tipo de materia prima analizada (Naher et al. (2024b)).

$$\text{Proteína bruta (\%)} = N \times F \quad (3.3)$$

Donde:

- N = porcentaje de nitrógeno determinado en la muestra mediante el método Kjeldahl.
- F = factor de conversión de nitrógeno a proteína (para harina de trigo y panes se usa 5.7; para *P. ostreatus* se puede emplear 4.38, dependiendo de la bibliografía).

De esta forma, la medición del nitrógeno total permitió estimar la cantidad de proteína bruta presente en el hongo, la harina y las formulaciones de panificación.

3.5 Calidad del pan

El contenido de humedad se determina por pérdida de peso en una muestra de 3 a 5 g, secado a $130 \pm 3^\circ\text{C}$ durante una hora, como indica el AOAC, (14.004), máximo 15 % de humedad.

3.5.1 Determinación del volumen del pan

El volumen del pan se determinó mediante el método de desplazamiento de semillas de colza, técnica reconocida por su precisión para productos panificados. Cada pieza se colocó en un recipiente volumétrico previamente calibrado, el cual se llenó con semillas hasta cubrir completamente la muestra. Posteriormente, se retiró el pan y se midió el volumen desplazado por las semillas, registrándose el valor en centímetros cúbicos (cm³).

Con el volumen obtenido y el peso de cada pieza de pan, se calculó el volumen específico mediante la Ecuación 3.4, expresando la relación entre el volumen y la masa de la muestra. Este parámetro permite comparar la calidad del pan en términos de estructura y aireación interna (AACC, 20000) (Calvo Carrillo et al., 2020b).

$$\text{Volumen específico: (cm}^3\text{/g)} = V/P \quad (3.4)$$

Donde:

- V = volumen del pan determinado por desplazamiento de semillas (cm³).
- P = peso del pan después del enfriamiento (g).

Este análisis permite evaluar de forma comparativa la esponjosidad y la calidad estructural del pan en función del tipo de fermento y el porcentaje de sustitución de *P. ostreatus* en las formulaciones.

3.5.2 Determinación de textura y color de miga

La calidad interna del pan se evaluó visual y táctilmente, analizando la distribución, tamaño y uniformidad de los alvéolos presentes en la miga, así como su color. Se utilizó un sistema de puntuación adaptado del método AACC (2000), descrito en la Tabla 4, que clasifica la textura de la miga según el grado de uniformidad y el color observado.

La escala asigna puntuaciones desde 10, para migas con celdas pequeñas y homogéneamente distribuidas y color blanco (miga de mejor calidad), hasta 5, correspondiente a migas con alvéolos grandes, zonas compactas y tonalidades café oscuro. Este sistema permite relacionar de forma práctica la estructura interna del pan con las variaciones en el tipo de fermento, el contenido de azúcar y el nivel de sustitución de *P. ostreatus*. El análisis de textura se complementó con una evaluación sensorial simple, verificando la resistencia al tacto y la cohesión de la miga. Para el color, se consideró visualmente el tono predominante, comparándolo con la referencia establecida en la tabla de ponderaciones. Aunque este análisis no utiliza una fórmula matemática, se basa en criterios estandarizados de calidad visual y estructural que permiten comparar objetivamente las formulaciones.

Tabla 3.2: Ponderaciones para calidad de la miga

Puntuación	Textura de la miga	Color de la miga
10	Excelente: celdas pequeñas y uniformes	Blanco
9	Muy bueno: presencia de algunas celdas grandes	Crema
8	Bueno: presencia de muchas celdas grandes	Amarillo crema
7	Regular: celdas grandes y chicas no distribuidas uniformemente	Amarillo
6	Pobre: celdas pobres con desgarraduras	Café
5	Mala: celdas grandes y compactación en algunas zonas	Café oscuro

3.5.3 Determinación de color en pan

El color de la corteza del pan se evaluó utilizando un colorímetro portátil, obteniendo los valores según el sistema CIELAB, que permite describir el color en tres dimensiones: **L**, **a** y **b***. Las mediciones se realizaron en superficies lisas y uniformes, preferentemente en los extremos de cada pieza, donde el volumen es más estable y se reduce la variabilidad. Para cada formulación se realizaron tres mediciones y se promedió el resultado.

En este sistema, L^* indica la luminosidad o claridad del color, con valores que van de 0 (negro) a 100 (blanco). El parámetro a^* define la posición en el eje verde-rojo, donde valores negativos representan tonos verdes y valores positivos reflejan tonalidades rojizas. Por su parte, b^* describe el eje azul-amarillo, donde valores negativos indican colores azulados y positivos, tonalidades amarillas.

Los datos obtenidos del colorímetro se procesaron además con la herramienta en línea <https://www.nixsensor.com/free-color-convert/>, que permite visualizar digitalmente el color medido y confirmar su correspondencia con los valores numéricos del sistema CIELAB. Esta metodología, adaptada del método AACC (2000) facilita la comparación objetiva entre tratamientos, permitiendo analizar cómo el tipo de fermento y el porcentaje de sustitución de *P. ostreatus* influyen en el color final de la corteza del pan (Naher et al., 2024b).

3.5.4 Actividad de agua en el pan

La actividad de agua (A_w) del pan se midió utilizando un equipo AquaLab (DECAGON). Antes de cada sesión de análisis, se realizó la calibración del dispositivo con agua destilada, asegurando que el equipo registrara valores dentro del rango estándar de 0.997 a 1.000.

Para cada determinación, las muestras de pan se pulverizaron para obtener una superficie uniforme y representativa, y posteriormente se colocaron en las celdas de medición del equipo. El análisis se realizó por triplicado para cada tratamiento, y el equipo registró automáticamente el valor de actividad de agua una vez alcanzada la estabilidad.

La A_w es un parámetro que expresa la fracción de agua disponible para las reacciones químicas y el crecimiento microbiano en los alimentos. Sus valores oscilan entre 0 (sin agua disponible) y 1 (agua pura). En el caso del pan, una A_w elevada está asociada con una mayor susceptibilidad a

deterioro microbiológico y reducción de la vida útil, mientras que valores más bajos favorecen una mejor estabilidad durante el almacenamiento.

Este análisis permitió evaluar cómo el tipo de fermento, la proporción de azúcar y el nivel de sustitución de *P. ostreatus* modifican la disponibilidad de agua en las formulaciones y, por tanto, su estabilidad tecnológica.

3.6 Estudio de vida útil

La vida útil del pan se evaluó mediante almacenamiento controlado a temperaturas de (20, 30 y 40 ± 2 °C), registrando periódicamente los cambios en peso, humedad y actividad de agua (*A_w*). Las mediciones se realizaron por triplicado en intervalos definidos hasta observar deterioro evidente en la textura y la frescura del pan. Estos parámetros se consideraron indicadores del proceso de envejecimiento y pérdida de calidad durante el almacenamiento.

Los datos obtenidos se ajustaron a modelos cinéticos clásicos de orden cero, primer orden y segundo orden para describir la evolución de cada atributo en función del tiempo. El ajuste permitió determinar qué modelo representaba mejor el comportamiento de cada variable durante el almacenamiento (Rahman et al., 2020). Para el **modelo de orden cero**, que asume una variación lineal del atributo con respecto al tiempo, se utilizó la ecuación:

$$Q_t = Q_0 - k t \quad (3.5)$$

Donde:

- Q_t = valor del atributo (peso, humedad o *A_w*) en el tiempo t ,
- Q_0 = valor inicial del atributo al inicio del almacenamiento,

- k = constante de velocidad de deterioro (unidad por día),
- t = tiempo de almacenamiento (días).

Para el **modelo de primer orden**, que considera un cambio proporcional a la cantidad restante del atributo, se empleó:

$$\ln Q_t = \ln Q_0 - k t \quad (3.6)$$

Donde:

- $\ln Q_t$ = logaritmo natural del valor del atributo en el tiempo t ,
- $\ln Q_0$ = logaritmo natural del valor inicial del atributo,
- k = constante de velocidad de deterioro (1/día),
- t = tiempo de almacenamiento (días).

Finalmente, para el **modelo de segundo orden**, que describe procesos en los que la velocidad de cambio depende del cuadrado de la concentración o atributo, se aplicó:

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_0} + k t \quad (3.7)$$

Donde:

- $1/Q_t$ = inverso del valor del atributo en el tiempo t ,
- $1/Q_0$ = inverso del valor inicial del atributo,
- k = constante de velocidad de deterioro (1/(unidad·día)),
- t = tiempo de almacenamiento (días).

El mejor modelo cinético para cada variable se seleccionó considerando el mayor coeficiente de determinación (R^2) y el menor error estándar de estimación. El criterio para definir el final de la vida útil se estableció cuando la pérdida de peso superó el umbral que afectaba la textura, o cuando la humedad cayó por debajo del límite tecnológico aceptado (mínimo 11 %).

Este enfoque permitió describir con precisión la tendencia de deterioro del pan en función del tipo de fermento y el nivel de sustitución de *Pleurotus ostreatus*, identificando el comportamiento cinético más representativo para cada atributo.

3.7 Análisis estadístico

Los datos obtenidos de los tratamientos experimentales se procesaron utilizando el software R (versión 4.3.3 (2024-02-29) – “Angel Food Cake”), empleando los paquetes readxl, dplyr y agricolae para la gestión, análisis y comparación de los resultados.

En primer lugar, los datos fueron importados desde un archivo Excel, excluyendo las columnas correspondientes a réplicas para trabajar únicamente con los valores promedio por unidad experimental. La variable **Tratamiento** se convirtió a factor para garantizar su reconocimiento como variable categórica en los análisis. De manera adicional, las variables de tipo carácter presentes en el conjunto de datos se transformaron en factores para mantener la consistencia en el modelado.

El análisis se realizó únicamente sobre las variables numéricas registradas para cada tratamiento, que incluyeron parámetros como volumen específico, humedad, actividad de agua, textura, color de corteza y miga. Para cada variable se ajustó un modelo de Análisis de varianza (ANOVA) bajo el siguiente planteamiento general:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (3.8)$$

Donde:

- Y_{ij} es el valor observado de la variable de respuesta en el tratamiento i y repetición j , μ es la media general,
- τ_i es el efecto del tratamiento i ,
- ε_{ij} es el error experimental asociado, asumido como normalmente distribuido con media cero y varianza constante.

Cuando el ANOVA mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), se aplicó la prueba de comparación de medias Least Significant Difference (LSD) para agrupar los tratamientos según su comportamiento. Esta prueba se realizó sin ajuste adicional ($p.adj = none$), generando grupos de tratamientos ordenados de forma descendente según el valor medio de la variable analizada.

Los resultados del ANOVA se almacenaron en un archivo de salida independiente, mientras que las comparaciones múltiples mediante LSD se registraron en un archivo complementario. Esta estructura permitió identificar de forma clara qué tratamientos diferían estadísticamente y cómo se agrupaban de acuerdo con la respuesta evaluada.

El análisis estadístico permitió determinar la influencia del tipo de fermento, el nivel de sustitución de *P. ostreatus* y el contenido de azúcar en la calidad fisicoquímica, tecnológica y sensorial del pan, facilitando la interpretación de los efectos experimentales.

4. Resultados y discusiones

4.1 Obtención de harina de *P. ostreatus* y análisis de su composición química

La harina de *P. ostreatus* presentó un contenido nutricional que confirma su potencial como ingrediente funcional en productos de panificación (Tabla 4.1). El contenido proteico estimado fue de **20.8 %**, valor que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura, que oscila entre 7.3 % y 53.1 % dependiendo de las condiciones de cultivo y la metodología analítica utilizada (Ahmed et al., 2013; Alananbeh et al., 2014; Carrasco-González et al., 2017). Esta concentración proteica es comparable a la observada en leguminosas como guisantes o frijoles, lo que refuerza su uso como fuente alternativa de proteínas vegetales.

Desde el punto de vista cualitativo, *P. ostreatus* aporta aminoácidos esenciales que complementan la deficiencia de lisina en cereales como el trigo, aunque presenta niveles relativamente bajos de leucina. Esta limitación puede compensarse mediante formulaciones que combinen el hongo con cereales y leguminosas, generando mezclas con mayor valor biológico y calidad proteica equiparable a fuentes animales como la caseína o el huevo. De hecho, estudios previos han demostrado que la combinación de harinas de hongos comestibles con trigo o leguminosas mejora significativamente la biodisponibilidad de aminoácidos esenciales, optimizando el perfil nutricional del producto final (Ananbeh et al., 2014; Carrasco-González et al., 2017).

El contenido de cenizas determinado fue **5.70 %**, valor que refleja una contribución mineral relevante y que se encuentra dentro del intervalo reportado por otros autores (4.1 % a 15.9 %), lo que sugiere la presencia de micronutrientes como potasio, fósforo y hierro. Además, la humedad residual observada (8.56 %) se mantiene dentro del límite recomendado para garantizar la estabilidad del polvo antes de su incorporación en formulaciones panificables, evitando el riesgo de rehidratación y desarrollo microbiano durante su almacenamiento.

Estos resultados evidencian que la harina de *P. ostreatus* además de ser una fuente viable de proteínas vegetales y minerales, pero también puede actuar como un ingrediente funcional que mejora el perfil nutricional del pan. Su integración con harina de trigo permite compensar deficiencias aminoacídicas y contribuir a la formulación de productos enriquecidos con mejor balance nutricional.

Con base en los resultados, la incorporación de *P. ostreatus* en formulaciones de panificación ha demostrado mejorar el perfil nutricional del producto, aumentando el contenido proteico, el aporte de aminoácidos esenciales y minerales como potasio y fósforo, además de contribuir fibra dietética y compuestos bioactivos con potencial efecto en la reducción del índice glucémico, lo que favorece su aplicación como alimento funcional para apoyar la salud metabólica (Effiong et al., 2024; Losoya-Sifuentes et al., 2022; Lu et al., 2018; Mohammed et al., 2018). Sustituciones entre 5 % y 20 % de harina de trigo por polvo de *P. ostreatus* han mostrado modificar de forma relevante las propiedades nutricionales y funcionales del pan, posicionándolo como un producto con potencial nutracéutico (Losoya-Sifuentes et al., 2022).

Desde el punto de vista tecnológico, la adición de este ingrediente altera la viscosidad, la absorción de agua y la estabilidad de la masa, reduciendo el volumen específico de la pieza, pero aumentando su densidad nutricional, con posibles mejoras en la vida útil por la presencia de compuestos bioactivos (Gaglio et al., 2019a; Lu et al., 2018). En términos sensoriales, las evaluaciones han mostrado aceptabilidad cuando se optimizan los niveles de sustitución, equilibrando el aporte nutricional con la textura y el sabor del producto (Gaglio et al., 2019a). Por lo tanto, la integración de *P. ostreatus* en panes representa una estrategia viable para desarrollar alimentos con valor funcional, siempre que se definan formulaciones que mantengan un equilibrio entre la calidad nutricional, tecnológica y la aceptación del consumidor.

Tabla 4.1: Composición proximal de la harina de *P. ostreatus* .

Referencia	Humedad	Cenizas	Proteína	CHO	Grasa
Esta tesis	8.56 ± 1.17	5.70 ± 0.05	N/R	N/R	N/R
Aracén, S. L. (2013)	N/R	N/R	20.80 ± 0.60	N/R	N/R
[carrasco-gonzalez2017]	N/R	4.1 - 15.9	7.3 - 53.1	13.5 - 85.8	0.5 - 7.6
[alananbeh2014]	N/R	N/R	8.00	15.55	0.71
[ahmed2013]	90.01 ± 0.3	11.4 ± 0.4	28.4 ± 0.4	29.6 ± 0.4	3.8 ± 0.0

N/R=No reportado

4.2 Caracterización física de panes testigo

La caracterización física de las formulaciones testigo permitió analizar los efectos del tiempo de almacenamiento, la composición de la masa y el tipo de fermento sobre atributos clave como humedad, color de corteza y volumen. La Tabla 4.2 evidencia diferencias significativas ($p < 0.05$) en los parámetros de humedad, color de corteza y volumen entre las formulaciones testigo, reflejadas en las letras asignadas a cada media.

En cuanto a **humedad**, los valores más altos se observaron en **B41.2** (25.76 %) y **B41.1** (22.61 %), que difirieron significativamente de los niveles más bajos registrados en **B3** (12.33 %) y **B2** (12.44 %). Esta variabilidad confirma que el tiempo transcurrido entre la elaboración y la medición impactó la retención de agua en la miga, como resultado de la migración de humedad hacia la corteza y la retrogradación del almidón (Mellado & Haros, 2016). Las formulaciones con fechas de análisis más alejadas del horneado retuvieron más humedad aparente, probablemente por condiciones de almacenamiento que ralentizaron la pérdida de agua, mientras que las muestras analizadas en menor tiempo tras la cocción mostraron valores más homogéneos y bajos.

En el **color de la corteza**, el parámetro L^* presentó diferencias claras entre formulaciones; los valores más altos correspondieron a **B31** (75.28), con cortezas más claras y tonalidades blanco-amarillentas, significativamente distintas de **B51** (41.62) y **B5** (42.41), que mostraron cortezas marrón oscuro. Esta diferencia está directamente relacionada con la presencia y concentración de azúcares reductores en la masa, que favorecen la Reacción de Maillard y producen un mayor oscurecimiento ([Igartúa & Sceni, 2023](#)). El parámetro a^* también presentó diferencias significativas; por ejemplo, **B5.1** (20.09) y **B5** (17.84) exhibieron tonalidades rojizas más marcadas por la combinación de pulque y azúcares, mientras que **B3** (2.83) y **B31** (2.94) se mantuvieron en rangos más bajos con una coloración menos intensa. Para b^* , los valores oscilaron entre 18.34 (**B31**) y 37.88 (**B51**), confirmando que todas las formulaciones mantuvieron tonalidades amarillas características de panes blancos, aunque con diferencias significativas que dependen de la proporción de proteínas y azúcares en la masa ([Losoya-Sifuentes et al., 2022](#); [Naher et al., 2024b](#)).

Respecto al **volumen específico**, se identificaron agrupaciones significativas: **B2** y **B4** obtuvieron los valores más altos (705 y 687 mL), en contraste con los volúmenes más bajos en **B1** (526 mL) y **B3** (523 mL). Estas diferencias reflejan la influencia del tipo de fermento y la actividad del gluten; la levadura comercial favoreció la producción de dióxido de carbono y la formación de una red proteica estable que permitió una mayor expansión de la masa ([Calvo Carrillo et al., 2020a](#)). El pulque fresco también contribuyó al volumen, pero con menor eficacia que la levadura, mientras que el pulque congelado redujo notablemente la fermentación activa. Además, la absorción de agua y el desarrollo del gluten determinaron la fortaleza de la masa, como han reportado estudios sobre la relación entre proteínas y extensibilidad en harinas panificables ([Trasmonte Pinday, 2023a](#)).

Estas diferencias estadísticas confirman que la formulación, el tipo de fermento y el manejo post-horneado influyen de manera determinante en la calidad física del pan, afectando tanto su percepción sensorial como su estabilidad durante el almacenamiento.

La evaluación del efecto del tiempo de almacenamiento, la composición de la masa y el tipo de fermentación sobre las propiedades físicas del pan permite comprender cómo parámetros como el contenido de humedad, el color de la corteza medido mediante el sistema CIELAB y el volumen específico están estrechamente relacionados con procesos bioquímicos como la retrogradación del almidón, la reacción de Maillard y la estabilidad de la red de gluten, los cuales determinan la percepción de frescura y calidad del producto. La pérdida gradual de humedad durante el almacenamiento acelera el endurecimiento de la miga y reduce la aceptabilidad sensorial, consecuencia de la retrogradación de la amilopectina y de la redistribución interna del agua, fenómenos que se intensifican a temperaturas elevadas ([Alpers et al., 2021](#); [Nashmi & Naser, 2023](#); [Wanjuu et al., 2018](#)).

La composición de la masa influye de manera directa en la retención de humedad y, por extensión, en la textura; la adición de ingredientes fortificantes o el uso de fermentaciones como la masa madre favorecen la cohesión y prolongan la vida útil por la capacidad de retener agua y estabilizar la estructura interna ([Bieniek & Buksa, 2024](#); [H. Iqbal et al., 2023](#); [Martins et al., 2021](#)). El color de la corteza, determinado por la reacción de Maillard, aporta atributos sensoriales deseables y varía según la concentración de azúcares y proteínas, así como las condiciones de horneado y almacenamiento, afectando la apariencia y la aceptación del consumidor ([ALjahdali & Carbonero, 2019](#); [Wu et al., 2018](#); [Yu et al., 2018](#)). Por su parte, el volumen específico depende de la capacidad de la red de gluten para retener gases durante la fermentación, pero puede deteriorarse con condiciones de almacenamiento adversas, alterando tanto la estructura como la percepción de calidad ([Gao et al., 2022](#); [Ibrahim et al., 2020](#)). Por lo tanto, la interacción entre formulación, fermentación y condiciones de almacenamiento determina de forma integral la calidad física y sensorial del pan, proporcionando bases para optimizar procesos y mejorar la estabilidad del producto en la industria panadera.

Tabla 4.2: Caracterización física de panes testigo (blancos).

	B1	B2	B3	B4	B31	B41	B5	B51	B41.1	B41.2	B2.1
H	12.69 ± 0.37 ^a	12.44±0.42 ^b	12.3±0.58 ^b	13.85±0.39 ^c	21.16±0.87 ^d	16.58±0.61 ^e	18.89± 0.37 ^e	18.42±1.54 ^e	22.61±2.48 ^e	25.76±13.8 ^e	23.05 ±11.4 ^b
L*	65.57±0.12 ^a	54.94±0.76 ^b	66.5±0.21 ^c	43.71±0.22 ^d	75.28±0.17 ^e	51.26±0.03 ^f	42.41±0.06 ^g	41.62±0.23 ^h	62.71±0.04 ^f	52.00±0.03 ^f	60.44±0.06 ^b
a*	4.16±0.31 ^a	12.94±0.03 ^b	2.83±0.04 ^b	17.63±0.05 ^c	2.94±0.52 ^d	13.27±0.15 ^e	17.84±0.03 ^f	20.09±0.04 ^f	12.91±0.04 ^e	14.17±0.04 ^e	13.40±0.05 ^b
b*	23.41±0.91 ^a	32.28±0.11 ^b	19.43±0.03 ^c	33.7±0.02 ^d	18.34±0.02 ^e	28.73±0.02 ^f	30.67±0.05 ^g	37.88±0.03 ^h	29.73±0.03 ^f	30.74±0.05 ^f	27.01±0.06 ^f
Tono											
Pan											
V	526± 2.9 ^a	705±5.0 ^a	523±2.9 ^b	687±2.9 ^c	553±2.9 ^d	663±2.9 ^e	686±10.0 ^e	644±2.9 ^f	635±2.9 ^f	665±5.0 ^e	691±5.0 ^e
PV	6	8	6	8	6	7	8	7	7	7	8

Nota: Los valores representan media ± desviación estándar. Letras minúsculas diferentes dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba LSD (*Least Significant Difference*, $p < 0.05$).

Variables: H: Contenido de humedad (%, m/m); V: Volumen; PV: Ponderación de volumen.

4.3 Análisis de panes con sustitución de harina *P. ostreatus* alta concentración 3 a 7 %

En las formulaciones con sustitución de harina de *P. ostreatus* en concentraciones de 3 % a 7 %, se observaron variaciones significativas en los parámetros de humedad, color de corteza y volumen (Tabla 4.3). En cuanto a la humedad, el valor más alto correspondió a **P38** (22.93), que difirió estadísticamente de **P5** (16.31), el valor más bajo. Los panes con mayor concentración de hongo tendieron a mostrar una ligera disminución de humedad respecto al pan blanco de referencia (**B5**, 18.42), aunque sin una relación estrictamente lineal. Esto coincide con lo descrito en (Hu, Xu, et al., 2022), donde se reportó que la adición de harina de hongo reduce la capacidad de retención de agua de la masa, debido a su contenido en fibra que interfiere en la formación de la red de gluten durante el horneado, limitando así la retención de humedad y la capacidad de unión de agua y gas (Yin et al., 2021). Por tanto, la sustitución parcial de harina de trigo por harina de hongo compromete la textura y la suavidad del pan, atributos que dependen estrechamente del nivel de humedad.

El **color de la corteza**, evaluado mediante los parámetros L^* , a^* y b^* , mostró cambios claros conforme aumentó la sustitución de harina. El valor mínimo de luminosidad (L^*) se registró en **P7** (43.39^f), indicando una tonalidad más oscura, mientras que el máximo se observó en **P38** (56.56^b), siendo estadísticamente diferente de las formulaciones más oscuras. Este oscurecimiento se asocia con la Reacción de Maillard, intensificada por el contenido de proteínas y azúcares en la masa, fenómeno también descrito en galletas y panes bajos en azúcar y grasa (Caponio et al., 2025). En el parámetro a^* , que refleja la tendencia rojiza, los valores más altos se dieron en **B5** (20.19^g), significativamente superiores a los de **P38** (11.29^f), lo que indica que la adición de hongo atenuó las tonalidades rojizas. Por su parte, b^* , asociado a tonalidades amarillas, mostró su máximo en **B5** (37.99^g) y descendió progresivamente en las formulaciones con mayor sustitución, llegando a valores menores

en **P38** (28.29^f). Esto confirma que tanto la proporción de azúcar como la presencia de proteínas del hongo afectan la coloración final de la corteza, más allá de la propia sustitución de harina ([Caponio et al., 2025](#); [Gaglio et al., 2019b](#)).

Respecto al **volumen específico**, las formulaciones con doble adición de azúcar, como **P3** (652 mL^C), conservaron un mejor volumen en comparación con **P78** (609 mL^{ab}), que presentó la menor expansión. Aunque todas las formulaciones obtuvieron la misma ponderación sensorial (7), las letras de la prueba LSD evidencian que los tratamientos con mayor concentración de hongo presentan volúmenes significativamente menores. Esto se explica porque la harina de hongo no aporta gluten, debilitando la red viscoelástica responsable de retener el dióxido de carbono producido durante la fermentación, tal como se describe en ([Trasmonte Pinday, 2023b](#)). Sin embargo, la adición de azúcar parece contrarrestar parcialmente esta pérdida, ya que mejora la gelatinización del almidón y aumenta la temperatura de desnaturalización de las proteínas, lo que favorece la expansión de las burbujas de aire durante el horneado ([Rathnayake et al., 2018](#)). Resultados similares fueron reportados en ([Gaglio et al., 2019b](#)), quienes observaron que la incorporación de hongos comestibles reduce el volumen del pan al limitar la formación de gluten.

Estos resultados demuestran que la sustitución parcial de harina de trigo por harina de *P. ostreatus* afecta de forma significativa la humedad, el color y el volumen del pan, y que estas variaciones dependen de la cantidad de hongo incorporado y de la proporción de azúcares y proteínas presentes en la masa. La prueba LSD confirma que las diferencias entre tratamientos son estadísticamente relevantes, lo que refuerza la necesidad de optimizar la formulación para equilibrar las propiedades tecnológicas y sensoriales de panes enriquecidos con hongo. La incorporación de *P. ostreatus* en formulaciones panarias aporta beneficios nutricionales asociados a compuestos bioactivos y antioxidantes, pero también introduce desafíos tecnológicos que afectan la textura, la vida útil y la aceptación sensorial. La inclusión de polvo de

hongo modifica la estructura de la miga al debilitar la red de gluten, lo que genera mayor dureza y reduce la elasticidad y el volumen, fenómeno observado en panes enriquecidos con *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus eryngii* (Gaglio et al., 2019a; Stepniewska et al., 2025). Este efecto obliga a implementar estrategias de optimización que mitiguen el deterioro de la estructura viscoelástica sin perder las ventajas funcionales derivadas de su contenido en fibra y β -glucanos.

El reemplazo parcial de harina de trigo altera también la **retención de humedad** y el **volumen específico**, ya que la masa enriquecida presenta menor capacidad para conservar agua y retener el dióxido de carbono generado durante la fermentación, afectando la expansión de la masa y la percepción de frescura (Losoya-Sifuentes et al., 2022). Aunque estos panes pueden ofrecer perfiles sensoriales con mayor complejidad aromática, también se reportan cambios en color y aroma que no siempre son bien aceptados por los consumidores (Lysakowska et al., 2024).

La coloración de la corteza se ve influenciada por la interacción entre azúcares y proteínas durante la reacción de Maillard, mientras que el aumento en la concentración de hongo tiende a oscurecer la miga y modificar las tonalidades esperadas.

Desde el punto de vista nutricional, la fortificación con *Pleurotus spp.* incrementa el aporte de minerales, vitaminas y polisacáridos con efectos inmunomoduladores, aunque la biodisponibilidad de estos compuestos depende de la matriz del pan y de la interacción con otros ingredientes (Irshad et al., 2023; Lavelli et al., 2018; Losoya-Sifuentes et al., 2022). Sin embargo, alcanzar un equilibrio entre valor nutricional, propiedades tecnológicas y aceptación sensorial sigue siendo un reto, pues concentraciones elevadas mejoran el perfil funcional, pero deterioran la textura y reducen la aceptación del consumidor (Gaglio et al., 2019a).

Estudios recientes proponen optimizar las tasas de sustitución para mantener atributos sensoriales atractivos y al mismo tiempo potenciar los beneficios nutricionales ([Torres-Martínez et al., 2023](#)).

Por lo tanto, el enriquecimiento del pan con *P. ostreatus* ofrece un enfoque viable para desarrollar productos con valor funcional, siempre que se ajusten las

formulaciones y procesos para minimizar las limitaciones tecnológicas y mejorar su aceptación en el mercado (Bermúdez et al., 2023).

Tabla 4.3: Caracterización física y fisicoquímica de panes con PO 3 - 7

	B51	P3	P5	P7	B41.1	P38	P58	P78
H	18.42 ±1.6 ^c	16.58 ± 0.6 ^{bc}	16.31 ±1.5 ^{bc}	17.55±1.49 ^{bc}	22.61 ±2.5 ^b	22.93 ± 0.9 ^a	21.72 ±3.3 ^{ab}	19.47± 0.6 ^{abc}
L*	41.6±0.04 ^f	46.55±0.19 ^{de}	46.4±0.57 ^e	43.39±0.13 ^f	62.71±0.03 ^{ab}	54.59±0.02 ^a	56.56±0.04 ^b	53.02± 0.16 ^c
a*	20.1±0.05 ^g	17.22±0.05 ^b	17.25±0.37 ^{ab}	16.81±0.01 ^c	12.91±0.04 ^{de}	11.29±0.03 ^f	12.75±0.11 ^e	13±0.14 ^d
b*	37.8±0.14 ^g	32.05±0.03 ^{bc}	32.27±0.03 ^a	31.83±0.08 ^c	29.73±0.11 ^{de}	28.29±0.07 ^f	28.84±0.02 ^e	30.68±0.02 ^d
								
								
V	643.6±7.6 ^c	652±13.2 ^c	645±8.7 ^c	640±2.9 ^{bc}	635±5.0 ^b	630±2.9 ^{bc}	617±2.9 ^{ab}	608.6±0.0 ^{ab}
PV	7	7	7	7	7	7	7	7

Nota: Los valores representan media ± desviación estándar. Letras minúsculas diferentes dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba LSD (*Least Significant Difference*, $p < 0.05$). **Variables:** H: Contenido de humedad (%, m/m); V: Volumen; PV: Ponderación de volumen.

4.4 Análisis de panes reducidos 1 a 3 % de *P. ostreatus*.

En **humedad**, la tabla 4.4 muestra que todos los tratamientos comparten la misma letra (^a), lo que indica ausencia de diferencias significativas entre las formulaciones evaluadas. Aunque se observan valores numéricos variables, desde el máximo en **L1** (25.32 %^a) hasta el mínimo en **F1** (14.13 %^a), la alta desviación estándar en la mayoría de los casos sugiere que las pérdidas de humedad no fueron consistentes, posiblemente por el corto tiempo entre hornado y análisis. Esto confirma que en sustituciones bajas de hongo la retención de agua sigue siendo comparable al pan de referencia, aunque el pulque, al incorporar diferentes microorganismos, podría incrementar la competencia por agua y azúcares disponibles en la masa (Vernon-Carter et al., 2017). En **color**, sí se evidencian variaciones estadísticas. El parámetro L* alcanzó su máximo en **L3** (61.99^a) y el mínimo en **F2** (44.21^{ab}), indicando que las formulaciones con pulque y hongo tienden a ser más oscuras. En a*, el valor más alto se registró en **L1** (14.6^a), significativamente superior a **L3** (9.45^f), lo que demuestra que el tipo de fermento y la concentración de hongo modifican la tendencia rojiza de la corteza. Para b*, que refleja tonalidades amarillas, el rango fue de 27.01^e (**B2, L3**) a 30.7^b (**B41**), con diferencias estadísticamente relevantes. Estos resultados confirman que el pulque y el hongo, al aportar proteínas y aminoácidos adicionales, influyen en las reacciones de Maillard y modifican la coloración final del pan, como ha sido señalado previamente (Da Costa Borges et al., 2021).

En **volumen**, las letras revelan variaciones importantes. El mayor volumen correspondió a **B2** (692 mL^c) y **L1** (682 mL^c), significativamente superiores a **F2** (642 mL^a) y **L3** (640 mL^a). Esto evidencia que incluso en niveles reducidos de sustitución, la fermentación con levadura mantiene una red de gluten más eficiente para retener dióxido de carbono, mientras que el uso de pulque tiende a limitar la expansión de la masa. Resultados similares han sido descritos para panes elaborados con fermentos mixtos y sustituciones parciales de harina, donde la menor cantidad de gluten disponible disminuye la capacidad de retención gaseosa (Trasmonte

[Pinday, 2023b](#)). La Tabla 4.4 confirma que en sustituciones bajas de *P. ostreatus* la humedad no presenta diferencias significativas, pero el color y el volumen sí muestran variaciones detectables por la prueba LSD. Estas modificaciones dependen del tipo de fermentación y de la interacción entre las proteínas del hongo, el pulque y el gluten de la harina de trigo, afectando la luminosidad, las tonalidades rojizas y amarillas de la corteza, así como la capacidad de expansión del pan.

Las formulaciones con sustitución reducida de *P. ostreatus* (1–3 %) muestran que, aunque la **humedad** no presentó diferencias significativas según la prueba LSD, sí se evidencian ajustes en la **luminosidad y tonalidades de la corteza**, así como en el **volumen específico**, dependientes del tipo de fermento y del nivel de sustitución (Tabla 4.4). Estos resultados coinciden con investigaciones que señalan que bajas proporciones de harina de hongo modifican la absorción de agua en la masa y, por extensión, la retención de humedad en el pan final, aunque sin comprometer de manera drástica su frescura ([Nie et al., 2019](#)). En el color, las variaciones en L*, a* y b* confirman que la presencia de proteínas y aminoácidos adicionales del hongo y del pulque intensifica las reacciones de Maillard, generando cortezas más oscuras y con matices rojizos, tal como se ha descrito para panes enriquecidos con harinas no convencionales ([Crawford et al., 2019](#)). En cuanto al volumen, las formulaciones fermentadas con levadura, como **L1**, conservaron mayor expansión, mientras que aquellas con pulque presentaron reducciones asociadas a la interferencia de las fibras del hongo en la red de gluten, limitando la retención gaseosa y generando estructuras más densas ([Li et al., 2019](#); [Lysakowska et al., 2024](#)). La influencia del proceso fermentativo también se refleja en la textura y en la aceptabilidad sensorial, ya que la combinación de fermentos mixtos puede mejorar parcialmente estas propiedades al estabilizar las proteínas del gluten durante la fermentación ([Hu, Zhang, et al., 2022](#); [Xia et al., 2022](#)). En síntesis, sustituciones bajas de *P. ostreatus* permiten enriquecer nutricionalmente el pan sin alterar de forma

severa su comportamiento tecnológico, pero requieren optimizar el tipo de fermento y la formulación para equilibrar el color, la estructura y el volumen.

Tabla 4.4: Caracterización física y fisicoquímica de panes con *P. ostreatus* 1-3

	B41.2	F1	F2	F3	B2.2	L1	L2	L3
H	25.76 ±13.8 ^a	14.13 ± 1.17 ^a	24.99 ± 6.06 ^a	17.49 ± 11.5 ^a	23.05 ±11.4 ^a	25.32 ± 2.11 ^a	14.31 ± 8.03 ^a	21.05 ±5.63 ^a
L*	52± 0.15 ^b	58±0.31 ^{ab}	44.21±0.51 ^{ab}	58.98±0.01 ^a	60.44±0.02 ^a	48.57±0.01 ^a	53.84±0.05 ^b	61.99±0.02 ^a
a*	14.2±0.04 ^a	12.5±0.02 ^e	16.55±0.03 ^b	11.75±0.02 ^d	13.4±0.06 ^c	^b 14.6±0.04 ^a	12.94±0.08 ^c	9.45±0.02 ^f
b*	30.7±0.04 ^b	29.7±0.05 ^d	28.87±0.03 ^a	30.06±0.03 ^c	27.01±0.01 ^e	30.44±0.00 ^b	30.40±0.01 ^f	27.01±0.06 ^e
								
								
V	665±5.0 ^b	6467±2.9 ^a	641±2.9 ^a	643±2.9 ^a	692±7.6 ^c	681.6±	657±5.8 ^b	640±5.0 ^a
PV	7	7	7	7	8	8	7	7

Nota: Los valores representan media ± desviación estándar. Letras minúsculas diferentes dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba LSD (*Least Significant Difference*, $p < 0.05$). **Variables:** H: Contenido de humedad (% , m/m); V: Volumen; PV: Ponderación de volumen.

4.5 Análisis de la textura y color de la miga

En la Tabla 4.5 se observa que las formulaciones testigo, particularmente **B51** y **B5**, obtuvieron las ponderaciones más altas en **textura** (10 y 9, respectivamente) y en **color** (10 y 9), destacándose por su miga uniforme y de tonalidad blanco-crema, considerada óptima para un pan tradicional. Estos valores contrastan con las formulaciones con adición de *P. ostreatus*, donde se evidencia una reducción en la calidad de la miga, reflejada en ponderaciones de textura entre 5 y 7. Sin embargo, algunos tratamientos como **P3** (7 en textura y 9 en color) y **F3** (9 y 8) lograron mantener una aceptabilidad visual y estructural aceptable, lo que sugiere que el hongo puede incorporarse sin comprometer completamente la estructura si se optimizan otros factores de la formulación. Esta disminución de calidad en los panes con hongo concuerda con lo descrito por (Oprea & Gaceu, 2020), donde las harinas sustitutas alteran la formación de redes viscoelásticas, reduciendo la uniformidad de la miga.

El análisis del **color de la miga** muestra una clara diferenciación entre los tratamientos con y sin *P. ostreatus*. Los panes control presentan tonos homogéneos blanco-crema, mientras que las formulaciones con hongo tienden a tonalidades más amarillas o ligeramente oscuras, atribuibles a la interacción de aminoácidos y azúcares en la reacción de Maillard, intensificada por las proteínas y fibras aportadas por el hongo y el pulque (Filipčev et al., 2021). Además, la miga de los panes testigo exhibe celdas pequeñas y una porosidad más fina, correlacionada con un mayor volumen final; esto coincide con las observaciones de (Filipčev et al., 2021), quienes asociaron mayor volumen con mejor suavidad y porosidad en panes tradicionales.

En las formulaciones con *P. ostreatus*, la **textura** se ve comprometida debido a la disminución de las capacidades viscoelásticas de la masa, como ocurre en **P38** y **P58**, que obtuvieron las calificaciones más bajas (5 en textura y 6–7 en color). No obstante, la formulación **P3**, que contiene 3 % de hongo y el doble de azúcar (16 g), mostró una mejor miga, lo que sugiere que el incremento de azúcares disponibles

favorece la fermentación al proporcionar más sustrato a las levaduras y microorganismos del pulque, mejorando la estructura de la masa. Este efecto reafirma la importancia de ajustar la fermentación y la proporción de azúcares para compensar la pérdida de gluten funcional al sustituir parcialmente la harina de trigo.

Los resultados de la Tabla 4.5 demuestran que, si bien las formulaciones sin sustitución mantienen una calidad superior, ciertas combinaciones con *P. ostreatus* como **P3** y **F3** logran un desempeño aceptable. Esto indica que la incorporación de harina de *P. ostreatus* es viable si se optimizan variables como la fermentación controlada, la cantidad de azúcar y la proporción de hongo, logrando un equilibrio entre la funcionalidad tecnológica y la aceptabilidad sensorial.

Tabla 4.5: Evaluación comparativa de la textura y el color de miga en panes formulados con y sin adición de *P. ostreatus*.

Código	Tipo de fermentación	Contenido de <i>P. ostreatus</i>	Ponderación de textura	Ponderación de color	Imagen de la miga
B1	Sin fermento	0%	5	8	
B2	Levadura	0%	7	8	

B31	Pulque fresco	0%	5	8	
B41	Pulque fresco + levadura	0%	8	9	
B5	Pulque fresco + levadura + azúcar	0%	9	9	
B51	Ídem anterior	0%	10	10	

P7	Ídem anterior	7%	6	7
----	---------------	----	---	---



P5	Ídem anterior	5%	7	8
----	---------------	----	---	---



P3	Ídem anterior	3%	7	9
----	---------------	----	---	---



P78	B41 + hongo	7%	6	7
-----	-------------	----	---	---



P58	B41 + hongo	5%	5	6
-----	-------------	----	---	---



P38	B41 + hongo	3%	5	7
-----	-------------	----	---	---



F1	B41 + hongo	1%	8	8
----	-------------	----	---	---



F2	B41 + hongo	2%	7	8
----	-------------	----	---	---



F3	B41 + hongo	3%	9	8
----	-------------	----	---	---



L1	B2 + hongo	1%	7	9
----	------------	----	---	---



L2	B2 + hongo	2%	7	7
----	------------	----	---	---



L3	B2 + hongo	3%	7	7
----	------------	----	---	---



4.6 Fórmulas seleccionadas

En la Tabla 4.6 se observan variaciones en los parámetros físicos de las formulaciones seleccionadas. La actividad de agua se mantuvo en un rango estrecho de 0.85–0.87, con valores ligeramente superiores en los panes testigo (**BF y BL**, 0.87^a) respecto a las formulaciones con hongo y pulque (**F2, L1**, 0.85^c). Este comportamiento está asociado a la mayor presencia de proteínas y fibra dietética en las formulaciones enriquecidas con *Pleurotus*, que reduce la fracción de agua libre disponible para el sistema panario (Das et al., 2020).

En **humedad**, las letras LSD no reflejaron diferencias significativas (^a) entre tratamientos, aunque numéricamente se registraron valores más altos en panes fermentados con levadura, como **L1** (28.7 %^a), frente a los controles **BL y BF** (26.8 %^a). Esta estabilidad confirma que, tras un día de horneado, la pérdida de agua sigue un patrón gradual, determinada por la proporción de líquidos iniciales y por la capacidad de absorción de las fibras del hongo (Das et al., 2020).

El **color de la corteza** mostró mayor variabilidad. La luminosidad L* alcanzó valores máximos en **BL** (61.7^a) y **L1** (58.4^a), mientras que los valores mínimos se registraron en panes con pulque como **F1** (42.6^c), indicando tonalidades más oscuras. En a*, asociado a matices rojizos, se observaron los valores más altos en **F1** (19.8^a) y **L2** (19.6^a), superando al pan blanco **BL** (12.2^d). El parámetro b*, que representa tonalidades amarillas, fue máximo en **F2 y F3** (36.3^a y 35.1^a) y mínimo en **BL** (29.7^c). Estas variaciones cromáticas se relacionan con las reacciones de Maillard potenciadas por las proteínas del hongo y los compuestos fenólicos presentes en el pulque (Losoya-Sifuentes et al., 2022; Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas et al., 2019). En **volumen**, las formulaciones con mejor expansión fueron **F3** (627 mL^d) y **F2** (623 mL^d), superando a panes como **BL** (577 mL^a) y **L1** (580 mL^a). Aunque las ponderaciones fueron aceptables (6–7), las letras

confirman que la fermentación con pulque favorece ligeramente la expansión en comparación con la levadura, probablemente por la mayor disponibilidad de azúcares fermentables y la actividad microbiana más diversa (Das et al., 2020; Trasmonte Pinday, 2023b).

Tabla 4.6: Análisis de parámetros físicos del pan seleccionado.

	BF	F1	F2	F3	BL	L1	L2	L3
Peso	48.6 ± 2.8 ^a	49.0 ± 3.0 ^a	49.4 ± 3.8 ^a	49.2 ± 2.8 ^a	46.1 ± 1.6 ^a	46.5 ± 4.0 ^a	46.7 ± 0.7 ^a	47.6 ± 3.6 ^a
Aw	0.87 ± .00 ^a	0.86 ± .00 ^{bc}	0.85 ± .01 ^c	0.85 ± .01 ^{ab}	0.87 ± .01 ^c	0.85 ± .01 ^c	0.85 ± .00 ^c	0.85 ± .00 ^c
V	601±2.89 ^{bc}	615±10.0 ^{cd}	623±2.89 ^d	627±5.77 ^d	577±10.41 ^a	580±13.23 ^a	583±5.77 ^{ab}	600±21.79 ^{bc}
PV	7	7	7	7	6	6	6	7
L	56.6 ± 4.7 ^{ab}	42.6 ± 3.1 ^c	49.2 ± 7.9 ^{bc}	49.2 ± 1.0 ^{bc}	61.7 ± 4.7 ^a	58.4 ± 5.3 ^a	43.3 ± 1.8 ^c	49.1 ± 8.3 ^{bc}
a	14.3 ± 2.6 ^{bcd}	19.8 ± 0.9 ^a	18.0 ± 3.5 ^{ab}	17.7 ± 1.2 ^{abc}	12.2 ± 2.6 ^b	12.8 ± 3.2 ^{cd}	19.6 ± 0.3 ^a	16.7± 5.2 ^{abcd}
b	31.9 ± 3.0 ^{abc}	35.8 ± 1.1 ^a	36.3 ± 2.5 ^a	35.1 ± 1.1 ^a	29.7 ± 1.5 ^c	30.6 ± 3.5 ^{bc}	34.9 ± 0.6 ^{ab}	34.3 ± 4.2 ^{ab}
Color								
H	27.1 ± 4.4 ^a	28.1 ± 3.7	26.8 ± 2.6 ^a	28.1 ± 1.2 ^a	26.8 ± 1.9 ^a	28.7 ± 3.4 ^a	28.2 ± 4.2 ^a	27.8 ± 4.6 ^a

Nota: Los valores representan media $\pm$ desviación estándar. Letras minúsculas diferentes dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba LSD (*Least Significant Difference*, $p < 0.05$).

Variables: V: Volumen; PV: Ponderación de volumen; H: Contenido de humedad (% m/m); AW: Actividad de agua. Peso: Valor final obtenido luego de pasar las muestras por desecador.

La Tabla 4.7 evidencia que las formulaciones con pulque alcanzan los valores proteicos más altos, destacando **F2** (12.66 g^{ab}) frente a panes fermentados con levadura como **L3** (11.17 g^c). Estas diferencias sugieren que el tipo de fermento modula la retención o extracción de proteínas durante la panificación, posiblemente por la interacción entre los compuestos del pulque y la matriz proteica de la harina de trigo (Beck et al., 2017; S. Iqbal et al., 2024).

En conjunto, los datos confirman que la incorporación de *P. ostreatus* y el uso de pulque generan efectos diferenciados sobre las propiedades fisicoquímicas del pan. Aunque la sustitución parcial oscurece la corteza y reduce la expansión de la masa, contribuye a mejorar el perfil proteico y mantiene una actividad de agua adecuada para la estabilidad inicial. Formulaciones como **F2** y **F3** destacan por equilibrar volumen, color y contenido proteico, representando opciones viables para futuras evaluaciones sensoriales y de vida útil.

Tabla 4.7: Contenido de proteína (g) en panes seleccionados según formulación.

Formulación	Fermento	% de PO	Proteína (g) $\pm$ DE
F2	Pulque	2 %	12.66 $\pm$ 0.11 ^{ab}
F1	Pulque	1 %	12.31 $\pm$ 0.13 ^{ab}
F3	Pulque	3 %	12.44 $\pm$ 0.14 ^{ab}
L1	Levadura	1 %	11.53 $\pm$ 0.10 ^{bc}
L2	Levadura	2 %	11.61 $\pm$ 0.09 ^{abc}
L3	Levadura	3 %	11.17 $\pm$ 0.12 ^c
BL	Blanco	0 %	11.24 $\pm$ 0.08 ^c
BF	Testigo	0 %	11.29 $\pm$ 0.07 ^a

Nota: Los valores representan media $\pm$ desviación estándar. Letras minúsculas diferentes dentro de la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba LSD (*Least Significant Difference*, $p < 0.05$). PO = *P.ostreatus*

La incorporación de polvo de *P. ostreatus* en pan de trigo a niveles bajos de sustitución (1–5 %) modifica la matriz del pan equilibrando el enriquecimiento nutricional con un desempeño tecnológico y sensorial aceptable. La retención de humedad y la actividad de agua (A_w) se mantienen en rangos estables que retrasan el endurecimiento y limitan el desarrollo microbiano, ya que las fibras del hongo crean un entorno más hidrofílico que ralentiza la migración del agua durante las primeras 24–48 horas posteriores al horneado (Al-Atijawi & Almusawy, 2021; Lu et al., 2018; Srivastava et al., 2024). Esta retención mejora la preservación de la textura y mantiene la aceptabilidad del producto, evitando niveles de A_w que favorezcan el deterioro (Kaluzhskih et al., 2023).

Los atributos de color se ven influenciados por los compuestos fenólicos y las proteínas presentes en el hongo, que potencian las reacciones de Maillard durante el horneado. Esto genera cortezas más oscuras, con tonalidades rojizas y amarillas más intensas, reflejadas en la disminución del valor L^* y el aumento de a^* y b^* , aportando un perfil visual distintivo sin provocar un oscurecimiento excesivo cuando la sustitución es moderada (Lu et al., 2021; Lysakowska et al., 2024; Stepniewska et al., 2025).

La incorporación en niveles bajos también incrementa el contenido proteico y mejora su digestibilidad, ya que las proteínas del hongo interactúan con la red de gluten y aportan aminoácidos adicionales. El tipo de fermentación modula este efecto, observándose una mayor retención proteica en fermentaciones con levadura en comparación con las bacterianas lácticas (Desai et al., 2018; Lu et al., 2018; Proserpio, Lavelli, et al., 2019). El volumen del pan y la estructura de la miga se mantienen cuando la sustitución se limita al 1–5 %, ya que la red de gluten conserva suficiente elasticidad para retener gas durante la fermentación. A estos niveles, la miga permanece suave y porosa, evitando la densificación y dureza asociadas a porcentajes más altos de sustitución (Gaglio et al., 2019a; Proserpio, Lavelli, et al., 2019; Stepniewska et al., 2025).

Estos efectos han sido validados mediante pruebas LSD y otros análisis posthoc, confirmando que las variaciones observadas en la dinámica de humedad, los parámetros de color, el contenido proteico y los atributos estructurales son estadísticamente confiables ($p < 0.05$) (Lu et al., 2021; Roncolini et al., 2019).

La sustitución parcial con *P. ostreatus* mejora la calidad nutricional manteniendo un volumen aceptable, estabilidad de humedad y un color de corteza atractivo. La evidencia respalda la optimización cuidadosa de los niveles de incorporación y las estrategias de fermentación para lograr un equilibrio entre funcionalidad y las características preferidas por el consumidor.

4.7 Vida útil

La estimación de la vida útil se abordó mediante pruebas aceleradas a tres temperaturas (20, 30 y 40 °C), evaluando los cambios en humedad, actividad de agua (A_w) y peso en formulaciones de pan elaboradas con harina de *P. ostreatus* y distintos agentes de fermentación. Los resultados 4.8 fueron modelados cinéticamente, y los parámetros derivados se presentan en los anexos. A continuación, se discute su comportamiento general y su utilidad para describir el deterioro del producto durante el almacenamiento.

El peso presentó una evolución más consistente frente al tiempo y temperatura. Su ajuste al modelo de orden cero permitió una mejor representación del cambio físico observado, particularmente en panes formulados con levadura y 3 % de harina de *P. ostreatus*. En esta combinación, la constante de velocidad alcanzó su valor más alto (k

= 6.4815 a 40 °C), lo que refleja un proceso de pérdida progresiva de humedad que afecta la masa total y se relaciona con el endurecimiento del pan.

La humedad, aunque relevante desde el punto de vista regulatorio, resultó menos adecuada para describir los cambios durante la prueba acelerada. En varias formulaciones se detectaron valores iniciales por debajo del mínimo establecido por la norma mexicana para pan blanco (11 %), lo que limita su capacidad para generar predicciones válidas. Además, las oscilaciones observadas se vinculan más con la interacción del producto con el ambiente que con procesos internos.

En cuanto a la actividad de agua, las curvas de ajuste mostraron variabilidad en los días estimados y un rango amplio de valores Q , en algunos casos con sentido físico poco claro. A pesar de su asociación con la retrogradación del almidón y la pérdida de frescura, las condiciones de análisis no permitieron extraer una

tendencia robusta. No obstante, su comportamiento fue más estable en las formulaciones con levadura.

La Tabla 4.8 presenta un análisis comparativo. Los resultados muestran que el peso, bajo un enfoque cinético de orden cero, ofrece una representación más clara del deterioro en este tipo de producto. La incorporación de harina de *P. ostreatus* modificó la evolución de los atributos, en especial cuando se empleó levadura como agente fermentante. Las formulaciones con pulque mostraron mayor variabilidad, posiblemente por la naturaleza compleja de su microbiota y su interacción con la matriz.

La sección evidencia la necesidad de combinar parámetros fisicoquímicos en estudios de vida útil. Aunque la humedad y la A_w aportan información útil, su interpretación resulta más limitada cuando se aplican de forma aislada. El seguimiento del peso, por el contrario, se presenta como una opción más viable para establecer periodos de conservación orientados al consumidor.

Con base en estudios recientes, la evaluación de la vida útil en productos panificados funcionales requiere considerar no solo el comportamiento individual de variables como humedad, A_w y peso, sino su interacción con las condiciones de almacenamiento. Las formulaciones enriquecidas con harinas alternativas, como la de *P. ostreatus*, pueden presentar respuestas diferenciadas frente al envejecimiento acelerado, particularmente por fenómenos asociados a la retrogradación del almidón y la migración de agua en la matriz panaria (Alpers et al., 2021; Samakradhamrongthai et al., 2023). El modelado cinético permite predecir con mayor precisión estos procesos, especialmente cuando se seleccionan indicadores físicos que responden de forma proporcional al deterioro, como ocurre con el peso (Bayram et al., 2024; Samilyk et al., 2023). Aunque la literatura específica sobre panes con harina de *P. ostreatus* sigue siendo limitada, las aplicaciones previas de ingredientes funcionales en matrices similares respaldan la estrategia de utilizar enfoques combinados para establecer tiempos de conservación. Estos resultados refuerzan la pertinencia de integrar modelos predictivos con observaciones experimentales que permitan diseñar productos más estables y alineados con las expectativas del consumidor contemporáneo (Amoah et al., 2023; Hernández-Figueroa et al., 2023).

Tabla 4.8: Resumen de los parámetros cinéticos de deterioro en atributos de calidad del pan enriquecido con harina de *P. ostreatus*.

Atributo evaluado	¿Es atributo critico?	Modelo con mejor ajuste	Mayor constante de velocidad	Formulación y temperatura asociada	Orden cinético de esa constante
Humedad	No	Segundo orden	0.7576	Pulque con 1 % de PO 40°C	0
Actividad de agua	No	Segundo orden	0.982	Levadura con 1% de PO, 40°C	0
Peso	Sí	Orden cero	6.4815	Levadura con 3% de PO, 40°C	0

PO = *P. ostreatus*

5. Conclusión

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que la incorporación de la seta *P. ostreatus* molida en la formulación de panificación, a través del diseño de formulaciones blancas con diferentes combinaciones de levadura y pulque, influye de manera directa en parámetros de calidad física, como la humedad y textura de la miga.

El estudio evidenció que la variabilidad en el contenido de humedad está estrechamente vinculada con el tiempo transcurrido entre la elaboración y el análisis, lo que confirma la sensibilidad del producto al almacenamiento y su impacto en la percepción de frescura. Esta relación respalda la hipótesis planteada sobre la viabilidad de mejorar el perfil nutricional del pan sin comprometer su aceptabilidad sensorial, siempre que se controlen adecuadamente las condiciones de procesamiento y conservación. Asimismo, los resultados sugieren que la seta puede ser utilizada como ingrediente funcional en productos horneados, aunque es necesario seguir explorando su comportamiento tecnológico en matrices más complejas y en condiciones de almacenamiento prolongado, así como su interacción con otros componentes fermentativos. Esta investigación aporta evidencia útil para el desarrollo de productos panificados con valor agregado, con potencial aplicación en contextos de alimentación sustentable y nutrición accesible.

6. Anexos

6.1 Identificación y clasificación de mohos en los panes

La identificación de mohos observados en este trabajo no es primordial, sin embargo, se identificó a algunos de los que se tiene evidencia, indica que la clasificación de hongos se da a través de la evaluación de sus características morfológicas, la estructura de la colonia, el color de su superficie o la textura (Tabla A.1). Los hongos filamentosos de las levaduras se diferencian porque los primeros producen colonias aterciopeladas, en forma de algodón o textura pulverulenta, mientras que las levaduras son húmedas, viscosas e incluso cremosas.

De acuerdo con la bibliografía los mohos pueden crecer por debajo de 0.85 de actividad de agua, son aerobios, aunque algunas especies pueden ser anaerobias facultativas, crecen a temperaturas de 4°C y pH entre 3.5 - 6.5. En los alimentos horneados los géneros de mohos que pueden causar alteración son: *Penicillium*, *Aspergillus*, *Monilia*, *Mucor*, *Endomyces*, *Cladosporium*, *Fusarium* y *Rhizopus*.

Los mohos que crecieron en este estudio (Tabla A.1), coinciden con características principalmente *Penicillium chrysogenum* que en fase desarrollada, cepas algodonosas de color verde, está presente en F3, F1, mientras que en fase inicial se observa aterciopelado de color blanco P78, B581, L1 y P38 (en el primer pan detectable en la foto); por otra parte, P58 y P38 (panes del fondo) presentan otra contaminación de un moho que por su coloración negra, algodonosa y polvorienta se asocia a *Aspergillus niger*. Por último, B31 con dos imágenes, tiene moho con apariencia polvorienta-terrosa color verde se asimila con *Filifactor villosus*, el mismo autor explica que es el único moho que sus colonias iniciales son color verde (primer recuadro) otros mohos generalmente nacen de color blanco.

La identificación morfológica de los mohos observados permite inferir patrones recurrentes de contaminación asociados a ciertas formulaciones, especialmente aquellas con ingredientes menos

controlados como el pulque fresco. La presencia predominante de especies como *Penicillium chrysogenum* y *Aspergillus niger* (Tabla A.1) concuerda con las condiciones ambientales y de almacenamiento que favorecen su desarrollo, mientras que la posible aparición de *Filifactor villosus* sugiere una contaminación menos común pero relevante. Esta caracterización preliminar, aunque no confirmada mediante análisis microbiológico, resulta útil para orientar futuras estrategias de control en el desarrollo de productos panificados funcionales, destacando la importancia de estandarizar ingredientes y condiciones de fermentación para minimizar riesgos microbiológicos.

Tabla A.1: **Características observadas de mohos presentes en panes formulados con *P. ostreatus* y su posible identificación morfológica.**

Tratamiento	Apariencia	Color	Posible género o especie	Fase	Imagen
F3	Cepas algodonosas	Verde	<i>Penicilium chrysogenum</i>	Fase desarrollada	
F1	Cepas algodonosas	Verde	<i>Penicilium chrysogenum</i>	Fase desarrollada	
P78	Aterciopelado, compacto	Blanco	<i>Penicilium chrysogenum</i>	Fase inicial	
B581	Aterciopelado, compacto	Blanco	<i>Penicilium chrysogenum</i>	Fase inicial	

1.1	Aterciopelado, compacto	Blanco	<i>Penicillium chrysogenum</i>	Fase inicial	
P38	Algodonoso y negro (pan del fondo)	Negro	<i>Aspergillus niger</i>	Fase avanzada	
P58	Algodonoso y negro (pan del fondo)	Negro	<i>Aspergillus niger</i>	Fase avanzada	
B31	Polvoriento, terroso, desarrollo superficial difuso	Verde	<i>Filifactor villosus</i>	Fase inicial y avanzada	

6.2 Análisis cinético

A continuación, en las Tablas A.2, A.3 y Tabla A.4 se presentan los resultados del análisis cinético en cuanto a los factores de humedad, AW y peso.

Tabla A.2: Cuadro comparativo de los modelos para describir la evolución de la humedad frente al tiempo de almacenamiento y obtener la vida útil.

Muestra	Tiempo (días)	Modelo	k	R2	t (vida útil)	AIC
Pulque sin PO (BF)	0	0	-0.0044	0.0581	44.5	-777.2
	20	1	-0.0006	0.0626	26.2	-452.2
		2	0.0001	0.0674	2	-275.1
		0	-0.0374	0.1598	12.5	-1026
	30	1	-0.0046	0.1058	11.5	-369.9
		2	0.0007	0.0711	28.4	-127.7
		0	-0.0901	0.7576	-67	-256.1
	40	1	-0.0228	0.7573	-35.3	-76.4
		2	0.0059	0.7481	-19.2	-28.5
Pulque con 1 % de PO (F1)	0	0	-0.0044	0.0581	44.5	-777.2
<i>(igual al BF)</i>	...	...	...	...	...	...
Pulque con 3 % de PO (F3)	0	0	-0.1262	0.6666	-12.8	-159.9
	20	1	-0.0162	0.6782	1.3	-62.3
		2	0.0024	0.6806	0.1	-26.9
		0	-0.1749	0.6968	-10.4	-110.6
	30	1	-0.0281	0.605	-3.2	-43.9
		2	0.0058	0.532	-4.3	-18.2
		0	-0.0653	0.5586	-121	-413.5
	40	1	-0.0176	0.5606	-55.1	-115.8
		2	0.005	0.5582	-34.2	-45.5
Levadura sin PO (BL)	0	0	-0.0973	0.5443	18.9	-157.7

	20	1	-0.0079	0.5495	0	-100.2
		2	0.0007	0.5547	18.2	-67.1
		0	-0.1037	0.2923	-28	-194.3
	30	1	-0.0137	0.2397	0	-99.1
		2	0.0019	0.2047	-37.6	-68.5
		0	-0.1081	0.6129	-52.3	-210.8
	40	1	-0.0242	0.6463	0	-69.8
		2	0.0057	0.6756	-19	-28.8
Levadura con 1 % de PO (L1)	0	0	-0.2068	0.5449	26	-64.8
	20	1	-0.0149	0.5409	26.1	-39.2
		2	0.0011	0.524	25.9	-24.1
		0	-0.1151	0.6162	902	2959
	30	1	-0.0203	0.6387	-346	-623.9
		2	0.0041	0.6512	-170	-205.8
		0	-0.0768	0.3244	-63.3	-288.9
	40	1	-0.013	0.2931	-53.2	-133.4
2		0.0024	0.2677	-50.1	-81.2	
Levadura con 3 % de PO (L3)	0	0	-0.1322	0.5051	-8.5	-146.5
	20	1	-0.0165	0.4966	-3.2	-61.4
		2	0.0023	0.4764	0	-28
		0	-0.1768	0.7238	-19.3	-119.1
	30	1	-0.0312	0.7227	-10.7	-40.9
		2	0.0064	0.6965	-5.3	-15.1
		0	0.0097	0.0428	189.8	658.5
	40	1	-0.0012	0.0208	286.3	560.7
		2	0.001	0.02	110.7	149.4
		0	-0.001	0.036	-528	46

Tabla A.3: Cuadro comparativo de los modelos para describir la evolución de la AW frente al tiempo de almacenamiento para determinar la vida útil.

Muestra	Tiempo	Orden	A	B	C	D
Pulque sin PO (BF)	20	1	-0.003	0.036	-280	34
		2	0.012	0.036	-209	26
		0	-0.004	0.129	-57	16
	30	1	-0.013	0.157	-40	13
		2	0.044	0.193	-36	2
		0	-0.006	0.604	-49	1
	40	1	-0.031	0.603	-21	2
		2	0.164	0.602	-10	3
		0	0.16	0.029	997	-167
	20	1	0.002	0.027	502	-136
		2	-0.005	0.027	481	-122
		0	-0.003	0.496	-185	1
Pulque con 1 % de PO (F1)	30	1	-0.01	0.526	-95	2
		2	0.039	0.553	-84	-2
		0	-0.001	0.377	-88	-6
	40	1	-0.007	0.397	-27	-2
		2	0.044	0.417	-11	1
		0	-0.4	0.488	-91	28
Pulque con 3 % de PO (F3)	20	1	-0.012	0.483	-53	27
		2	0.036	0.483	-54	27
		0	-0.003	0.669	-145	4
	30	1	-0.013	0.668	-72	4
		2	0.05	0.665	-63	-3
		0	-0.005	0.484	-114	-7
	40	1	-0.026	0.516	-41	-3
		2	0.147	0.541	-23	0
		0				
Levadura sin PO (BL)	20	1	-0.006	0.12	-127	32
		2	0.022	0.12	-115	29
		0	-0.001	0.079	-446	-22
	30	1	-0.005	0.104	-200	-17
		2	0.024	0.132	-151	3
		0	-0.008	0.876	-62	3
	40	1	-0.037	0.838	-24	3
		2	0.184	0.791	-15	3
		0	-0.001	0.029	-349	62

Levadura con 1 % de
PO (L1)

20	1	-0.004	0.028	-231	62
	2	0.011	0.028	-264	61
	0	-0.004	0.332	-136	2
30	1	-0.014	0.382	-67	2
	2	0.058	0.43	-57	4
	0	-0.008	0.982	-56	4
40	1	-0.036	0.96	-24	4
	2	0.16	0.911	-17	4

Levadura con 3 % de
PO (L3)

20	0	-	0.912	-	778
		0.0004		5340	
	1	-0.009	0.319	-	1237
30	2	0.018	0.319	273	-55
	0	-0.004	0.425	-136	-2
	1	-0.017	0.459	-60	-1
	2	0.077	0.488	-45	5
40	0	-0.011	0.963	-39	6
	1	-0.047	0.964	-16	5
	2	0.212	0.909	-11	5

Tabla A.4: Cuadro comparativo de los modelos para describir la evolución del peso frente al tiempo de almacenamiento y obtener la vida útil.

Tratamiento	Temp (°C)	Orden	Velocidad	Coef. reacción	Q máx	Q mín
Pulque sin PO (BF)	20	0	6.1	0.2377	-331.4	384.1
		1	1.8	0.2399	-1081	-6654
		2	0.2	0.2421	8293	5866
	30	0	6	0.4421	-123.7	140.7
		1	1.8	0.4415	-4125	-2537
		2	0.2	0.4406	3258	2305
	40	0	6.3	0.0001	-	4E+16
		1	1.8	0.0346	1854	1130
		2	0.2	0.0326	-8493	-6012
Pulque con 1 % de PO (F1)	20	0	6.6	0.1335	-132.4	496.2
		1	1.9	0.1365	-9790	-5963
		2	0.2	0.1395	8019	5677
	30	0	6.4	0.4643	-	4E+16
		1	1.8	0.4685	1586	9699
		2	0.2	0.4726	-6607	-4676
	40	0	6.7	0.8462	25.84	-291.2
		1	1.9	0.1605	5588	3387
		2	0.2	0.1618	-5243	-3713
Pulque con 3 % de PO (F3)	20	0	6.1	0.027	2.4E+16	-
		1	1.8	0.0278	-	3E+17
		2	0.2	0.0286	-1171	-8286
	30	0	6.1	0.0395	484.4	-355.6
		1	1.8	0.0398	1156	7145
		2	0.2	0.0402	-8069	-5706
	40	0	6.4	0.9111	-89.91	205.6
		1	1.9	0.2089	-4810	-2940
		2	0.2	0.2059	4045	2863
Levadura sin PO (BL)	20	0	6.5	0.4396	-29.85	80.62
		1	1.9	0.442	-1753	-1070
		2	0.2	0.4443	1443	1021
	30	0	6.1	0.2854	20.61	-33.83
		1	1.8	0.2879	964.2	591.5
		2	0.2	0.2904	-8563	-6058
	40	0	6.3	0.6667	-2.666	-30.44
		1	1.8	0.1841	555.3	335.1
		2	0.2	0.1833	-5761	-4081

Levadura con 1 % de PO (L1)	20	0	6.2	0.5273	-61.24	83.54
		1	1.8	0.5197	-2263	-1389
		2	0.2	0.512	1799	1273
	30	0	6.1	0.2102	54.02	-60.01
		1	1.8	0.2151	1822	1121
		2	0.2	0.2201	-1471	-1041
	40	0	6.2	0.4545	-123.4	102.8
		1	1.8	0.1011	-3429	-2117
		2	0.2	0.1008	2576	1821
Levadura con 3 % de PO (L3)	20	0	6.3	0.5367	-29.19	59.22
		1	1.8	0.5384	-1330	-813.7
		2	0.2	0.5398	1030	7291
	30	0	6.4	0.5958	-43.94	124.5
		1	1.9	0.5932	-2764	-1687
		2	0.2	0.5904	2359	1670
	40	0	6.4	6.4815	6.481	-19.44
		1	1.8	0.4661	516.6	315.2
		2	0.2	0.4643	-5189	-3673

PO = *P. ostreatus*

7. Referencias

- Adam, A., Mohd Yatim, S. R., Masran, S. N. A. S., Shafie, F. A., & Wan Rasdi, N. (2022). Association of Attitudes and Behaviour With Household Sociodemographic on Food Waste Management in Kuching, Sarawak, Malaysia. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*, 18 (s15), 28–35. <https://doi.org/10.47836/mjmhs.18.s15.5>
- Ahmed, M., Abdullah, N., Ahmed, K. U., & Bhuyan, M. H. M. B. (2013). Yield and nutritional composition of oyster mushroom strains newly introduced in Bangladesh. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48 (2), 197–202. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2013000200010>
- Alananbeh, K. M., Bouquellah, N. A., & Al Kaff, N. S. (2014). Cultivation of oyster mushroom *Pleurotus ostreatus* on date-palm leaves mixed with other agro-wastes in Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21 (6), 616–625. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.08.001>
- Al-Atijawi, S. H., & Almusawy, R. S. (2021). The Effect of Adding Different Rates of Mushroom Powder to the Wheat Flour on the Nutritional Value of Proteins, Sensory and Physical Properties of Local Bread. *Journal of Life Science and Applied Research*, 2(2), 35–40. <https://doi.org/10.59807/jlsar.v2i2.33>
- Alencar, N. M. M., De Moraes, E. C., Steel, C. J., & Bolini, H. M. A. (2017). Sensory characterisation of gluten-free bread with addition of quinoa, amaranth flour and sweeteners as an alternative for coeliac patients. *International Journal of Food Science & Technology*, 52 (4), 872–879. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13349>
- ALjahdali, N., & Carbonero, F. (2019). Impact of Maillard reaction products on nutrition and health: Current knowledge and need to understand their fate in the human digestive system. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (3), 474–487. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1378865>
- Alpers, T., Kerpes, R., Frioli, M., Nobis, A., Hoi, K. I., Bach, A., Jekle, M., & Becker, T. (2021). Impact of Storing Condition on Staling and Microbial Spoilage Behavior of Bread and Their Contribution to Prevent Food Waste. *Foods*, 10 (1), 76. <https://doi.org/10.3390/foods10010076>
- Amoah, M., Adonu, R., Opoku, H., & Atiemoh, M. (2023). Consumer Awareness on Food Adulteration Practices on the Market and its Challenges. *EAS Journal of Humanities and Cultural Studies*, 5.
- Ampofo, E. (2014). *Postharvest handling and processing of oyster mushroom (Agaricus ostreatus)* [Tesis de {{Maestria}}]. Kwame Nkrumah University of Science; Technology.
- Ari Akin, P., & Miller, R. A. (2017). Starch–Hydrocolloid Interaction in Chemically Leavened Gluten-Free Sorghum Bread. *Cereal Chemistry*, 94 (5), 897–902.

- <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-17-0094-R> Bayram, I., Parra-Escudero, C., Decker, E. A., & Lu, J. (2024). Mathematical Modeling of Alpha-Tocopherol Early Degradation Kinetics to Predict the Shelf-Life of Bulk Oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72 (9), 4939–4946. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c08272>
- Beck, S. M., Knoerzer, K., Sellahewa, J., Emin, M. A., & Arcot, J. (2017). Effect of different heat-treatment times and applied shear on secondary structure, molecular weight distribution, solubility and rheological properties of pea protein isolate as investigated by capillary rheometry. *Journal of Food Engineering*, 208, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.016>
- Bender, D., Fraberger, V., Szepasvári, P., D'Amico, S., Tömösközi, S., Cavazzi, G., Jäger, H., Domig, K. J., & Schoenlechner, R. (2018). Effects of selected lactobacilli on the functional properties and stability of gluten-free sourdough bread. *European Food Research and Technology*, 244 (6), 1037–1046. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-3020-1>
- Bermúdez, R., Rangel-Vargas, E., Lorenzo, J. M., Rodríguez, J. A., Munekata, P. E. S., Teixeira, A., Pateiro, M., Romero, L., & Santos, E. M. (2023). Effect of Partial Meat Replacement by Hibiscus sabdariffa By-Product and Pleurotus djamor Powder on the Quality of Beef Patties. *Foods*, 12 (2), 391. <https://doi.org/10.3390/foods12020391>
- Bieniek, A., & Buksa, K. (2024). The Influence of Arabinoxylan on the Properties of Sourdough Wheat Bread. *Applied Sciences*, 14 (6), 2649. <https://doi.org/10.3390/app14062649>
- Boreczek, J., Litwinek, D., Żylińska-Urban, J., Izak, D., Buksa, K., Gawor, J., Gromadka, R., Bardowski, J. K., & Kowalczyk, M. (2020). Bacterial community dynamics in spontaneous sourdoughs made from wheat, spelt, and rye wholemeal flour. *MicrobiologyOpen*, 9 (4), e1009. <https://doi.org/10.1002/mbo3.1009>
- Bredariol, P., & Vanin, F. M. (2022). Bread baking Review: Insight into Technological Aspects in order to Preserve Nutrition. *Food Reviews International*, 38 (sup1), 651–668. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1878211>
- Calabrese, F. M., Ameur, H., Nikoloudaki, O., Celano, G., Vacca, M., Junior, W. J., Manzari, C., Vertè, F., Di Cagno, R., Pesole, G., De Angelis, M., & Gobbetti, M. (2022). Metabolic framework of spontaneous and synthetic sourdough metacommunities to reveal microbial players responsible for resilience and performance. *Microbiome*, 10 (1), 148. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01301-3>
- Calderon Lopez, J. C., Thepanondh, S., Sachdev, H., Palencia Avelar, A. M., & Del Carmen Leon, M. C. (2021). Sustainability and Economic Feasibility through the Production of Oyster Mushroom (*Pleurotus Ostreatus* (Jacq.) P. Kumm.) Derived from the Waste of Coffee-Industry: A Case Study in the Western Area of San

Salvador, El Salvador. *Polish Journal of Environmental Studies*.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/135700>

Calvo Carrillo, M. D. L. C., López Méndez, O. X., Carranco Jáuregui, M. E., & Marines, J. (2020b). Evaluación fisicoquímica y sensorial de un pan tipo baguette utilizando harinas de trigo (*Triticum* spp) y chícharo (*Pisum sativum* L.). *Biotecnia*, 22 (3), 116–124. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i3.1227>

Calvo Carrillo, M. D. L. C., López Méndez, O. X., Carranco Jáuregui, M. E., & Marines, J. (2020a). Evaluación fisicoquímica y sensorial de un pan tipo baguette utilizando harinas de trigo (*triticum* spp) y chícharo (*pisum sativum* L.). *Biotecnia*, 22 (3), 116–124. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i3.1227>

Caponio, G. R., Difonzo, G., Troilo, M., Marcotuli, I., Gadaleta, A., Tamma, G., Gargano, M. L., & Cirlincione, F. (2025). Enhancing the Nutritional and Health-Related Properties of Taralli Through the Use of *Pleurotus eryngii*: Focus on Antioxidant and Anti-Inflammatory Properties. *Antioxidants*, 14 (5), 550. <https://doi.org/10.3390/antiox14050550>

Carrasco-González, J. A., Serna-Saldívar, S. O., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2017). Nutritional composition and nutraceutical properties of the *Pleurotus* fruiting bodies: Potential use as food ingredient. *Journal of Food Composition and Analysis*, 58, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.01.016>

Chamutpong, S., Pummarin, T., & Noysang, C. (2019). Nutritional Properties, Antioxidant and Anti- Acetylcholinesterase Activities of *Pleurotus Ostreatus*. *Applied Mechanics and Materials*, 891, 14–20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.891.14>

Coțovanu, I., Mironeasa, C., & Mironeasa, S. (2023). Nutritionally Improved Wheat Bread Supplemented with Quinoa Flour of Large, Medium and Small Particle Sizes at Typical Doses. *Plants*, 12 (4), 698. <https://doi.org/10.3390/plants12040698>

Crawford, L. M., Kahlon, T. S., Wang, S. C., & Friedman, M. (2019). Acrylamide Content of Experimental Flatbreads Prepared from Potato, Quinoa, and Wheat Flours with Added Fruit and Vegetable Peels and Mushroom Powders. *Foods*, 8 (7), 228. <https://doi.org/10.3390/foods8070228>

Da Costa Borges, V., Fernandes, S. S., Da Rosa Zavareze, E., Haros, C. M., Hernandez, C. P., Guerra Dias,

A. R., & De Las Mercedes Salas-Mellado, M. (2021). Production of gluten free bread with flour and chia seeds (*Salvia hispânica* L). *Food Bioscience*, 43, 101294. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101294>

Das, R., Sarker, M., Lata, M. B., Islam, Md. A., Al Faik, Md. A., & Sarkar, S. (2020). Physicochemical Properties and Sensory Evaluation of Sponge Cake Supplemented with Hot Air and Freeze Dried Oyster Mushroom (<i>Pleurotus sajor-caju</i>). *World Journal of Engineering and Technology*, 08 (04), 665–674. <https://doi.org/10.4236/wjet.2020.84047>

- Desai, A. S., Beibeia, T., Brennan, M. A., Guo, X., Zeng, X.-A., & Brennan, C. S. (2018). Protein, Amino Acid, Fatty Acid Composition, and in Vitro Digestibility of Bread Fortified with *Oncorhynchus tshawytscha* Powder. *Nutrients*, 10 (12), 1923. <https://doi.org/10.3390/nu10121923>
- Dharma, M. S., Mukti, Y. P., Buschle-Diller, G., & Dewi, A. D. R. (2023). Estimation of Shelf-life of Porang Glucomannan Analog Rice By Accelerated Shelf-life Testing (ASLT) Method. In J. Sukweenadhi & F. Setiawan (Eds.), *Proceedings of the Conference on Natural Resources and Life Sciences 2022 (NRLS-BIO 2022)* (Vol. 38, pp. 58–63). Atlantis Press International BV. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-322-1_7
- Effiong, M. E., Umeokwochi, C. P., Afolabi, I. S., & Chinedu, S. N. (2024). 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., & 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>
- Enríquez Pico, J., Ramos Jaramillo, F., & Abril Carvajal, L. (2023). Evaluación de tres métodos de secado en champiñones variedad blanco (*Agaricus bisporus*). *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 5 (4), 50–57. <https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v5i4.645>
- Filipčev, B., Pojić, M., Šimurina, O., Mišan, A., & Mandić, A. (2021). Psyllium as an improver in gluten- free breads: Effect on volume, crumb texture, moisture binding and staling kinetics. *LWT*, 151, 112156. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112156>
- Fornito, S., Puliga, F., Leonardi, P., Di Foggia, M., Zambonelli, A., & Francioso, O. (2020). Degradative Ability of Mushrooms Cultivated on Corn Silage Digestate. *Molecules*, 25 (13), 3020. <https://doi.org/10.3390/molecules25133020>
- Gaglio, R., Guarcello, R., Venturella, G., Palazzolo, E., Francesca, N., Moschetti, G., Settanni, L., Saporita, P., & Gargano, M. L. (2019a). Microbiological, chemical and sensory aspects of bread supplemented with different percentages of the culinary mushroom *Pleurotus Eryngii* in powder form. *International Journal of Food Science & Technology*, 54 (4), 1197–1205. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13997>
- Gaglio, R., Guarcello, R., Venturella, G., Palazzolo, E., Francesca, N., Moschetti, G., Settanni, L., Saporita, P., & Gargano, M. L. (2019b). Microbiological, chemical and sensory aspects of bread supplemented with different percentages of the culinary mushroom *Pleurotus Eryngii* in powder form. *International Journal of Food Science & Technology*, 54 (4), 1197–1205. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13997>
- Galappaththi, M., Dauner, I., Madawala, S., & Karunarathna, S. (2021). Nutritional and medicinal benefits of Oyster (*Pleurotus*) mushrooms: A review. *Fungal Biotech*, 1 (2), 65–87. <https://doi.org/10.5943/FunBiotech/1/2/5>

- Gao, S., Hong, J., Liu, C., Zheng, X., Li, L., & Tian, X. (2022). Comparative study of different fermentation and cooking methods on dough rheology and the quality of Chinese steamed/baked bread. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46 (2). <https://doi.org/10.1111/jfpp.16221>
- Gashaw, G., & Getu, A. (2020). Evaluation of Antifungal Activity of *Pleurotus* species Cultivated on Different Agricultural Wastes in Chiro, Ethiopia. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, Of. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.DR-165>
- Giles-Gómez, M., Morales Huerta, X., Pastelin-Palacios, R., López-Macías, C., Flores Montesinos, M. S., Astudillo-Melgar, F., & Escalante, A. (2024). Analysis of the Probiotic Potential of *Lactiplantibacillus plantarum* LB1_P46 Isolated from the Mexican Fermented Pulque Beverage: A Functional and Genomic Analysis. *Microorganisms*, 12 (8), 1652. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081652>
- González, G. C. (2024). *Hongos comestibles silvestres en Patagonia, Argentina: Identificación molecular, evaluación y selección de métodos de preservación postcosecha* [Doctor de La {{Facultad}} de {{Ciencias Agrarias}} y {{Forestales}}, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/171499>
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., & Athanassiou, A. (2017). Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Scientific Reports*, 7(1), 41292. <https://doi.org/10.1038/srep41292>
- He, X., Li, X., Chen, D., Huang, S., & Tao, N. (2023). Effect on bread properties of partial substitution of wheat flour with oat flour and flour from oat grain germinated in the light or dark. *International Journal of Food Science & Technology*, 58 (4), 1979–1986. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16352>
- Hernández-Figueroa, R. H., Mani-López, E., Palou, E., & López-Malo, A. (2023). Sourdoughs as natural enhancers of bread quality and shelf life: A review. *Fermentation*, 10 (1), 7.
- Hu, Y., Xu, J., Sheng, Y., Liu, J., Li, H., Guo, M., Xu, W., Luo, Y., Huang, K., & He, X. (2022). *Pleurotus Ostreatus* Ameliorates Obesity by Modulating the Gut Microbiota in Obese Mice Induced by High-Fat Diet. *Nutrients*, 14 (9), 1868. <https://doi.org/10.3390/nu14091868>
- Hu, Y., Zhang, J., Wang, S., Liu, Y., Li, L., & Gao, M. (2022). Lactic acid bacteria synergistic fermentation affects the flavor and texture of bread. *Journal of Food Science*, 87 (4), 1823–1836. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16082>
- Huang, X., Schuppan, D., Rojas Tovar, L. E., Zevallos, V. F., Loponen, J., & Gänzle, M. (2020). Sourdough Fermentation Degrades Wheat Alpha-Amylase/Trypsin Inhibitor (ATI) and Reduces Pro-Inflammatory Activity. *Foods*, 9 (7), 943. <https://doi.org/10.3390/foods9070943>

- Huezo-Sánchez, A. R., Ortega-Rodríguez, E. M., Pérez-Armendáriz, B., & El-Kassis, E. G. (2023). Characterization of Bacterial Diversity in Aguamiel and Two Types of Pulque from the Zacatlán Region, México. *Fermentation*, 9 (6), 564. <https://doi.org/10.3390/fermentation9060564>
- Ibrahim, U. K., Rahman, N. A. A., Suzihaque, M. U. H., Hashib, S. A., & Aziz, R. A. A. (2020). Effect of baking conditions on the physical properties of bread incorporated with green coffee beans (GCB). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 736 (6), 062019. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/736/6/062019>
- Igartúa, D. E., & Sceni, P. (2023). Abordaje experimental para la enseñanza y el aprendizaje de la reacción de Maillard en química de los alimentos. *Educación Química*, 34. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.4.86124e>
- Iosca, G., Vero, L. D., Gullo, M., Licciardello, F., Quartieri, A., & Pulvirenti, A. (2020). Exploring the Microbial Community of Traditional Sourdoughs to Select Yeasts and Lactic Acid Bacteria. *The 1st International Electronic Conference on Microbiology*, 3. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020066003>
- Iqbal, H., Ali, T. M., Arif, S., Akbar, Q.-A., & Saeed, M. (2023). Effects of red rice flour addition on the rheological, textural, sensory and bioactive properties of wheat flour-based pan breads. *International Journal of Food Science & Technology*, 58 (1), 473–481. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16047>
- Iqbal, S., Tirpanalan-Staben, Ö., & Franke, K. (2024). Effect of solid-state fermentation with *Pleurotus Ostreatus* on the protein content and other nutritional components of de-seeded carob fruits. *Sustainable Food Technology*, 2 (5), 1537–1544. <https://doi.org/10.1039/d4fb00173g>
- Irshad, A., Tahir, A., Sharif, S., Khalid, A., Ali, S., Naz, A., Sadia, H., & Ameen, A. (2023). Determination of Nutritional and Biochemical Composition of Selected *Pleurotus* spp. *BioMed Research International*, 2023 (1). <https://doi.org/10.1155/2023/8150909>
- Islam, M. A., & Islam, S. (2024). Sourdough Bread Quality: Facts and Factors. *Foods*, 13 (13), 2132. <https://doi.org/10.3390/foods13132132>
- Kaluzhskih, A., Batrachenko, E., Kotelnikova, M., Yevglevskiy, R., & Ryumshina, S. (2023). Investigation of the possibility of using mushrooms in wheat bread production technology. *E3s Web of Conferences*, 390, 02027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339002027>
- Khan, M. A., Shakoor, S., Ameer, K., Farooqi, M. A., Rohi, M., Saeed, M., Asghar, M. T., Irshad, M. B., Waseem, M., Tanweer, S., Ali, U., Mohamed Ahmed, I. A., & Ramzan, Y. (2023). Effects of Dehydrated Moringa (*Moringa oleifera*) Leaf Powder Supplementation on Physicochemical, Antioxidant, Mineral, and Sensory Properties of Whole Wheat Flour Leavened Bread. *Journal of Food Quality*, 2023, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2023/4473000>
- Landis, E. A., Oliverio, A. M., McKenney, E. A., Nichols, L. M., Kfoury, N., Biango-Daniels, M., Shell, L. K., Madden, A. A., Shapiro, L., Sakunala, S., Drake, K., Robbat, A.,

- Booker, M., Dunn, R. R., Fierer, N., & Wolfe, B. E. (2021). The diversity and function of sourdough starter microbiomes. *eLife*, 10, e61644. <https://doi.org/10.7554/eLife.61644>
- Lavelli, V., Proserpio, C., Gallotti, F., Laureati, M., & Pagliarini, E. (2018). Circular reuse of bio-resources: The role of *Pleurotus* spp. in the development of functional foods. *Food & Function*, 9 (3), 1353–1372. <https://doi.org/10.1039/c7fo01747b>
- Li, X., Hu, H., Xu, F., Liu, Z., Zhang, L., & Zhang, H. (2019). Effects of aleurone-rich fraction on the hydration and rheological properties attributes of wheat dough. *International Journal of Food Science & Technology*, 54 (5), 1777–1786. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14073>
- Losoya-Sifuentes, C., Simões, L. S., Cruz, M., Rodriguez-Jasso, R. M., Loredó-Treviño, A., Teixeira, J. A., Nobre, C., & Belmares, R. (2022). Development and Characterization of *Pleurotus Ostreatus* Mushroom—Wheat Bread. *Starch - Stärke*, 74 (1-2), 2100126. <https://doi.org/10.1002/star.202100126>
- Lu, X., Brennan, M. A., Guan, W., Zhang, J., Yuan, L., & Brennan, C. S. (2021). Enhancing the Nutritional Properties of Bread by Incorporating Mushroom Bioactive Compounds: The Manipulation of the Pre-Dictive Glycaemic Response and the Phenolic Properties. *Foods*, 10 (4), 731. <https://doi.org/10.3390/foods10040731>
- Lu, X., Brennan, M. A., Serventi, L., & Brennan, C. S. (2018). Incorporation of mushroom powder into bread dough—effects on dough rheology and bread properties. *Cereal Chemistry*, 95 (3), 418–427. <https://doi.org/10.1002/cche.10043>
- Lysakowska, P., Sobota, A., Wirkijowska, A., Zarzycki, P., & Blicharz-Kania, A. (2024). The Impact of *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst. Supplementation on the Technological, Chemical, and Quality Parameters of Wheat Bread. *Foods*, 13 (19), 3101. <https://doi.org/10.3390/foods13193101>
- Martins, I. E., Shittu, T. A., Onabanjo, O. O., Adesina, A. D., Soares, A. G., Okolie, P. I., Kupoluyi, A. O., Ojo, O. A., & Obadina, A. O. (2021). Effect of packaging materials and storage conditions on the microbial quality of pearl millet sourdough bread. *Journal of Food Science and Technology*, 58 (1), 52–61. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04513-3>
- Mata, G., & Savoie, J.-M. (2012). *Agaricus subrufescens* un hongo comestible y medicinal de gran potencial en México. *Hongos Comestibles y Medicinales En Iberoamérica, Inv Estigación y Desarrollo En Un Entorno Multicultural*. México: Inecol-Ecosur, 137–142.
- Melini, V., Melini, F., Luziatelli, F., & Ruzzi, M. (2020). Functional Ingredients from Agri-Food Waste: Effect of Inclusion Thereof on Phenolic Compound Content and Bioaccessibility in Bakery Products. *Antioxidants*, 9 (12), 1216. <https://doi.org/10.3390/antiox9121216>

- Mellado, M. D. L. M. S., & Haros, M. (2016). Evaluación de la calidad tecnológica, nutricional y sensorial de productos de panadería por sustitución de harina de trigo por harina integral de arroz. *Brazilian Journal of Food Technology*, 19 (0). <https://doi.org/10.1590/1981-6723.0216>
- Minervini, F., Dinardo, F. R., Celano, G., De Angelis, M., & Gobbetti, M. (2018). Lactic Acid Bacterium Population Dynamics in Artisan Sourdoughs Over One Year of Daily Propagations Is Mainly Driven by Flour Microbiota and Nutrients. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1984. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01984>
- Mir, S. A., Farooq, S., Shah, M. A., Sofi, S. A., Dar, B. N., Sunooj, K. V., & Mousavi Khaneghah, A. (2023). Recent advancements in the development of multigrain bread. *Cereal Chemistry*, 100 (1), 72–82. <https://doi.org/10.1002/cche.10578>
- Mkhize, S. S., Cloete, J., Basson, A. K., & Zharare, G. E. (2016). Performance of *Pleurotus ostreatus* mushroom grown on maize stalk residues supplemented with various levels of maize flour and wheat bran. *Food Science and Technology*, 36 (4), 598–605. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.08516>
- Mohammed, A., Osman, A., El Masry, R., & El Saadany, S. (2018). Chemical Composition and the Antioxidant Activity of Two Edible Mushrooms. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 45 (4), 1385–1394. <https://doi.org/10.21608/zjar.2018.48588>
- Moss, R., & McSweeney, M. B. (2022). Effect of quinoa, chia and millet addition on consumer acceptability of gluten-free bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 57 (2), 1248–1258. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15509>
- Mykolenko, S. Y., Aliiev, E. B., & Dudin, V. Y. (2023). Composite wheat-amaranth flour baking properties and bread freshness. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1277, 012021.
- Naher, L., Mustaffa Bakri, N. A., Muhammad Sukhri, S. A. N., Nik Hassan, N. R., Mohd Firdaus Ganga, H., Md Zain, N., Abdul Rahman, N., Ch'ng, H. Y., & Mokhtar, S. I. (2024a). Economical substrate formulation for mushroom cultivation and food production of mushroom crackers to reduce postharvest waste. *Studies in Fungi*, 9 (1), 0–0. <https://doi.org/10.48130/sif-2024-0003>
- Naher, L., Mustaffa Bakri, N. A., Muhammad Sukhri, S. A. N., Nik Hassan, N. R., Mohd Firdaus Ganga, H., Md Zain, N., Abdul Rahman, N., Ch'ng, H. Y., & Mokhtar, S. I. (2024b). Economical substrate formulation for mushroom cultivation and food production of mushroom crackers to reduce postharvest waste. *Studies in Fungi*, 9 (1), 0–0. <https://doi.org/10.48130/sif-2024-0003>
- Nashmi, R. G., & Naser, J. M. (2023). Extending the Shelf-Life of Wheat Bread Using Pentosanes Extracted from Barley. *IRAQI JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES*, 54 (4), 939–949. <https://doi.org/10.36103/ijas.v54i4.1783>

- Nasir, S., Allai, F. M., Gani, M., Ganaie, S., Gul, K., Jabeen, A., & Majeed, D. (2020). Physical, Textural, Rheological, and Sensory Characteristics of Amaranth-Based Wheat Flour Bread. *International Journal of Food Science*, 2020, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8874872>
- Nie, Y., Jin, Y., Deng, C., Xu, L., Yu, M., Yang, W., Li, B., & Zhao, R. (2019). Rheological and microstructural properties of wheat dough supplemented with *Flammulina Velutipes* (mushroom) powder and soluble polysaccharides. *CyTA - Journal of Food*, 17 (1), 455–462. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1596986>
- Noor-us-Sana, Sibte-Abbas, M., Usman, M., Umar, R., & Arif, A. (2024). Nutritional and Sensory Evaluation of Bread Fortified with Defatted Chia Flour: Bread fortification using defatted chia flour. *UCP Journal of Science & Technology*, 2 (1), 09–17. <https://doi.org/10.24312/ucp-jst.02.01.406>
- Nugraha, M. I. S., Afrianto, E., Liviawaty, E., Pratama, R. I., & Rochima, E. (2022). Shelf Life of Combination Nori Sargassum sp. And Eucheuma spinosum with Aluminium Foil Packaging Based on the Accelerated Shelf Life Test Method. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 12–23. <https://doi.org/10.9734/ajfar/2022/v16i430377>
- Omale, S., Aguiyi, Jc., Bukar, Bb., Ede, So., Amagon, Ki., Amagon, L., Usman, O., V. Chinello, & Oshibanjo, Do. (2020). Fruiting Body of Pleurotus Ostreatus Reduces Serum Glucose and Modifies Oxidative Stress in Type 2 Diabetic: Drosophila Melanogaster (Fruit-Fly). *Advances in Pharmacology and Pharmacy*, 8 (2), 41–50. <https://doi.org/10.13189/app.2020.080302>
- Oprea, O. B., & Gaceu, L. (2020). Consumer acceptance and sensorial analysis of bread with grape seed flour. *E3s Web of Conferences*, 215, 01005.
- Orr, L., & Goossens, Y. (2024). Trimming the Plate: A Comprehensive Case Study on Effective Food Waste Reduction Strategies in Corporate Canteens. *Sustainability*, 16 (2), 785. <https://doi.org/10.3390/su16020785>
- Penalver, J. G., & Aldaya, M. M. (2022). The Role of the Food Banks in Saving Freshwater Resources through Reducing Food Waste: The Case of the Food Bank of Navarra, Spain. *Foods*, 11 (2), 163. <https://doi.org/10.3390/foods11020163>
- Peñalver, R., Ros, G., & Nieto, G. (2023). Development of Functional Gluten-Free Sourdough Bread with Pseudocereals and Enriched with Moringa oleifera. *Foods*, 12 (21), 3920. <https://doi.org/10.3390/foods12213920>
- Petkova, M., Stefanova, P., Gotcheva, V., & Angelov, A. (2021). Isolation and Characterization of Lactic Acid Bacteria and Yeasts from Typical Bulgarian Sourdoughs. *Microorganisms*, 9 (7), 1346. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071346>

- Pérez-Alvarado, O., Zepeda-Hernández, A., Garcia-Amezquita, L. E., Requena, T., Vinderola, G., & García- Cayuela, T. (2022). Role of lactic acid bacteria and yeasts in sourdough fermentation during breadmaking: Evaluation of postbiotic-like components and health benefits. *Frontiers in Microbiology*, 13, 969460. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.969460>
- Phan, C.-W., & Sabaratnam, V. (2012). Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96 (4), 863–873. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4446-9>
- Piskov, S., Timchenko, L., Grimm, W.-D., Rzhepakovsky, I., Avanesyan, S., Sizonenko, M., & Kurchenko, V. (2020). Effects of Various Drying Methods on Some Physico-Chemical Properties and the Antioxidant Profile and ACE Inhibition Activity of Oyster Mushrooms (*Pleurotus Ostreatus*). *Foods*, 9 (2), 160. <https://doi.org/10.3390/foods9020160>
- Prieto-Vázquez Del Mercado, P., Mojica, L., & Morales-Hernández, N. (2022). Protein Ingredients in Bread: Technological, Textural and Health Implications. *Foods*, 11 (16), 2399. <https://doi.org/10.3390/foods11162399>
- Prokic, D., Stepanov, J., Curcic, Lj., Stojic, N., & Pucarevic, M. (2022). The role of circular economy in food waste management in fulfilling the United Nations' sustainable development goals. *Acta Universitatis Sapientiae, Alimentaria*, 15 (1), 51–66. <https://doi.org/10.2478/ausal-2022-0005>
- Proserpio, C., Lavelli, V., Laureati, M., & Pagliarini, E. (2019). Effect of *Pleurotus Ostreatus* powder addition in vegetable soup on SS-glucan content, sensory perception, and acceptability. *Food Science & Nutrition*, 7 (2), 730–737. <https://doi.org/10.1002/fsn3.917>
- Proserpio, C., Pagliarini, E., Laureati, M., Frigerio, B., & Lavelli, V. (2019). Acceptance of a New Food Enriched in β -Glucans among Adolescents: Effects of Food Technology Neophobia and Healthy Food Habits. *Foods*, 8 (10), 433. <https://doi.org/10.3390/foods8100433>
- Purwanto, E., Yulianto, A., Biasini, N., Octavia, J. R., & Wati, V. O. (2023). Environmental awareness and intention to reduce food waste among urban people. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1168 (1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1168/1/012048>
- Rahimah, S. B., Djunaedi, D. D., Soeroto, A. Y., & Bisri, T. (2019). The Phytochemical Screening, Total Phenolic Contents and Antioxidant Activities in Vitro of White Oyster Mushroom (*Pleurotus Ostreatus*) Preparations. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 7(15), 2404–2412. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2019.741>
- Rahman, Md. S., Hassan, Md. K., Talukder, F. U., Rahman, Md. S., & Akther, Mst. M. (2020). Combined effect of low temperature and thickness of polypropylene package on shelf life and quality of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Journal of Horticulture and Postharvest Research, Online First*. <https://doi.org/10.22077/jhpr.2020.3376.1>

- Rathnayake, H. A., Navaratne, S. B., & Navaratne, C. M. (2018). Porous Crumb Structure of Leavened Baked Products. *International Journal of Food Science*, 2018, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/8187318>
- Roblero-Mejía, D. O., Aguilar-Marcelino, L., & 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>
- Roby, B. H. M., Muhialdin, B. J., Abadl, M. M. T., Mat Nor, N. A., Marzlan, A. A., Lim, S. A. H., Mustapha, N. A., & Meor Hussin, A. S. (2020). Physical properties, storage stability, and consumer acceptability for sourdough bread produced using encapsulated kombucha sourdough starter culture. *Journal of Food Science*, 85 (8), 2286–2295. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15302>
- Rodriguez-Sandoval, E., Otálvaro-Arenas, J. A., & Hernandez, V. (2017). Bread quality of flours substituted with modified cassava starches: Modified cassava starches in composite breads. *Starch - Stärke*, 69 (5-6), 1600253. <https://doi.org/10.1002/star.201600253>
- Romero Arenas, O., Valencia De Ita, M. A., Rivera Tapia, J. A., Tello Salgado, I., Villarreal Espino Barros, O. A., & Damián Huato, M. A. (2018). Capacidad productiva de *Pleurotus ostreatus* utilizando alfalfa deshidratada como suplemento en diferentes sustratos agrícolas. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 15 (2), 145–160. <https://doi.org/10.22231/asyd.v15i2.788>
- Romero-Arenas, O., Martínez Carrera, M., Landeta-Cortés, G., Rodríguez-Hernández, V., Villa-Ruano, N., & Rivera, A. (2023). Pilot Study of Diet Supplemented with Sold-Out Substrate of *Pleurotus ostreatus* in the Feeding of Backyard Broilers. *Applied Sciences*, 13 (13), 7428. <https://doi.org/10.3390/app13137428>
- Roncolini, A., Milanović, V., Cardinali, F., Osimani, A., Garofalo, C., Sabbatini, R., Clementi, F., Pasquini, M., Mozzon, M., Foligni, R., Raffaelli, N., Zamporlini, F., Minazzato, G., Trombetta, M. F., Van Buitenen, A., Van Campenhout, L., & Aquilanti, L. (2019). Protein fortification with mealworm (*Tenebrio molitor* L.) Powder: Effect on textural, microbiological, nutritional and sensory features of bread. *PLOS ONE*, 14 (2), e0211747. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211747>
- Royse, D. J., Baars, J., & Tan, Q. (2017). Current Overview of Mushroom Production in the World. In C. Z. Diego & A. Pardo-Giménez (Eds.), *Edible and Medicinal Mushrooms* (1st ed., pp. 5–13). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119149446.ch2>

- Salehi, F. (2019). Characterization of different mushrooms powder and its application in bakery products: A review. *International Journal of Food Properties*, 22 (1), 1375–1385. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1650765>
- Salemdeeb, R., Zu Ermgassen, E. K. H. J., Kim, M. H., Balmford, A., & Al-Tabbaa, A. (2017). Environmental and health impacts of using food waste as animal feed: A comparative analysis of food waste management options. *Journal of Cleaner Production*, 140, 871–880. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.049>
- Samakradhamrongthai, R. S., Wanikorn, B., Nortuy, N., Jannu, T., & Renaldi, G. (2023). Application of mannitol and kale protein extract in the development of Sung Yod rice bread and its stability during storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 58 (3), 1506–1515. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16320>
- Samilyk, M., Demidova, E., Nazarenko, Y., Tymoshenko, A., Ryzhkova, T., Severin, R., Hnoievy, I., & Yatsenko, I. (2023). Formation of the Quality and Shelf Life of Bread Through the Addition of Rowanberry Powder. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 123 (11).
- Sayed-Ahmad, B., Talou, T., Straumite, E., Sabovics, M., Kruma, Z., Saad, Z., Hijazi, A., & Merah, O. (2018). Evaluation of Nutritional and Technological Attributes of Whole Wheat Based Bread Fortified with Chia Flour. *Foods*, 7 (9), 135. <https://doi.org/10.3390/foods7090135>
- Sharma, P., Gaur, V. K., Sirohi, R., Varjani, S., Kim, S. H., & Wong, J. W. (2021). Sustainable processing of food waste for production of bio-based products for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 325, 124684.
- Siti-Nuramira, J., Farhana, R., Nabil, S., Jafari, S. M., & Raseetha, S. (2022). Impact of drying methods on the quality of grey (*Pleurotus sajor caju*) and pink (*Pleurotus djamor*) oyster mushrooms. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16 (5), 3331–3343. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01435-w>
- Srivastava, A., Attri, B. L., Kamal, S., Pathera, A. K., Kashyap, R., Verma, S., & Sharma, V. P. (2024). Nutritional enhancement, microstructural modifications, and sensory evaluation of mushroom-enriched multigrain bread. *International Journal of Food Science and Technology*, 59 (12), 9523–9531. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17602>
- Stepniewska, S., Salamon, A., Cacak-Pietrzak, G., Piecyk, M., & Kowalska, H. (2025). The Impact of Oyster Mushrooms (*Pleurotus ostreatus*) on the Baking Quality of Rye Flour and Nutrition Composition and Antioxidant Potential of Rye Bread. *Foods*, 14 (2), 199. <https://doi.org/10.3390/foods14020199>
- Syska, K., Ropiudin, R., Universitas Jenderal Soedirman, Rudiyantri, E., Universitas Nahdlatul Ulama Purwokerto, Nurhayati, A. D., Universitas Nahdlatul Ulama Purwokerto, Wahdah, F., & Universitas Nahdlatul Ulama Purwokerto. (2023). Estimation of Shelf Life of Pegagan Tea (*Centella asiatica* (L) Urban) using Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) Method with Arrhenius Model. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 11 (3), 244–256. <https://doi.org/10.21776/ub.jkptb.2023.011.03.02>

- Torres-Martínez, B. D. M., Vargas-Sánchez, R. D., Pérez-Alvarez, J. Á., Fernández-López, J., Viuda-Martos, M., Esqueda, M., Rodríguez-Carpena, J. G., Ibarra-Arias, F. J., Torrescano-Urrutia, G. R., & Sánchez-Escalante, A. (2024). Bio-Valorization of Spent Coffee Grounds and Potato Peel as Substrates for *Pleurotus ostreatus* Growth. *Foods*, 13 (23), 3774. <https://doi.org/10.3390/foods13233774>
- Torres-Martínez, B. D. M., Vargas-Sánchez, R. D., Torrescano-Urrutia, G. R., Esqueda, M. C., Rodríguez-Carpena, J. G., Fernández-López, J., Pérez-Álvarez, J. Á., & Sánchez-Escalante, A. (2023). Propiedades fisicoquímicas, tecnofuncionales y antioxidantes de harinas de *Pleurotus* spp. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 26. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.595>
- Törös, G., El-Ramady, H., Prokisch, J., Velasco, F., Llanaj, X., Nguyen, D. H. H., & Peles, F. (2023). Modulation of the Gut Microbiota with Prebiotics and Antimicrobial Agents from *Pleurotus ostreatus* Mushroom. *Foods*, 12(10), 2010. <https://doi.org/10.3390/foods12102010>
- Trasmonte Pinday, W. (2023a). Efecto de la harina de *Chenopodium* quinua, del tiempo y la temperatura de fermentación en el volumen de masa fermentada y en la calidad del pan francés. *Cátedra Villarreal Posgrado*, 2 (1), 1–16. <https://doi.org/10.24039/rcvp2023211673>
- Trasmonte Pinday, W. (2023b). Efecto de la harina de *Chenopodium* quinua, del tiempo y la temperatura de fermentación en el volumen de masa fermentada y en la calidad del pan francés. *Cátedra Villarreal Posgrado*, 2 (1), 1–16. <https://doi.org/10.24039/rcvp2023211673>
- Tripathy, A., & Nayak, A. (2022). Studies on agronomic supplementation for production of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 4 (9), 173–180.
- Turksoy, S., Guzel, M., & Guzel, N. (2024). Effect of sourdough addition on gluten-free sorghum bread fortified with plant-based protein and dietary fiber: Functional, textural, and structural properties. *Cereal Chemistry*, 101 (3), 518–529. <https://doi.org/10.1002/cche.10752>
- Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Jamangapé Ovando, R. G., Palacios Pola, G., Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Caballero Roque, A., Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Zea Caloca, S. G., Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Meza Gordillo, P. I., Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Gutiérrez, P. E. Álvarez, & Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. (2019). Evaluación proximal y sensorial de pasta fettuccinie con sustitución parcial con harina de setas *Pleurotus ostreatus*. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 8 (19), 113–127. <https://doi.org/10.31644/imasd.19.2019.a07>

- Vernon-Carter, E. J., Garcia-Diaz, S., Reyes, I., Carrillo-Navas, H., & Alvarez-Ramirez, J. (2017). Rheological and thermal properties of dough and textural and microstructural characteristics of bread with pulque as leavening agent. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 9, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2017.03.001>
- Villalobos-Pezos, M., Muñoz Fariña, O., Ah-Hen, K. S., Garrido Figueroa, M.-F., García Figueroa, O., González Esparza, A., González Pérez De Medina, L., & Bastías Montes, J. M. (2024). Effects of Drying Treatments on the Physicochemical Characteristics and Antioxidant Properties of the Edible Wild Mushroom *Cyttaria espinosae* Lloyd (Digüeñe Mushroom). *Journal of Fungi*, 11 (1), 13. <https://doi.org/10.3390/jof11010013>
- Wanjuu, C., Abong, G., Mbogo, D., Heck, S., Low, J., & Muzhingi, T. (2018). The physiochemical properties and shelf-life of orange-fleshed sweet potato puree composite bread. *Food Science & Nutrition*, 6 (6), 1555–1563. <https://doi.org/10.1002/fsn3.710>
- Weng, Y., Yang, Y., Jin, Z., Yu, R., & Jiao, A. (2024). The mechanisms of various hydrocolloids regulating the quality and starch digestibility of whole rye bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 59 (4), 2676–2688. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17015>
- Wijewardhana, U. S., Jayasinghe, M. A., Wijesekara, I., & Ranaweera, K. K. D. S. (2025). High Protein Functional Breads for Sustainable Nutrition: A Futuristic Review. *Current Functional Foods*, 3 (2), e26668629315995. <https://doi.org/10.2174/0126668629315995240805053755>
- Wu, F., Lv, P., Yang, N., Jin, Y., Jin, Z., & Xu, X. (2018). Preparation of Maillard reaction flavor additive from germinated wheat and its effect on bread quality. *Cereal Chemistry*, 95 (1), 98–108. <https://doi.org/10.1002/cche.10019>
- Xia, T., Kim, K., & Kweon, M. (2022). Quality of Low-Allergy Wheat ('O-Free') Flour and Optimization of Its Bread-Baking Performance. *Foods*, 11 (21), 3399. <https://doi.org/10.3390/foods11213399>
- Yin, Z., Sun-Waterhouse, D., Wang, J., Ma, C., Waterhouse, G. I. N., & Kang, W. (2021). Polysaccharides from edible fungi *Pleurotus* spp.: Advances and perspectives. *Journal of Future Foods*, 1 (2), 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.01.002>
- Yu, J., Zhang, S., & Zhang, L. (2018). Evaluation of the extent of initial Maillard reaction during cooking some vegetables by direct measurement of the Amadori compounds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98 (1), 190–197. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8455>

- Yuan, B., Zhao, L., Yang, W., McClements, D. J., & Hu, Q. (2017). Enrichment of Bread with Nutraceutical- Rich Mushrooms: Impact of *Auricularia Auricula* (Mushroom) Flour Upon Quality Attributes of Wheat Dough and Bread. *Journal of Food Science*, 82 (9), 2041–2050. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13812>
- Zhang, Q., & Zhang, H. (2024). Assessing Agri-Food Waste Valorization Challenges and Solutions Considering Smart Technologies: An Integrated Fermatean Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach. *Sustainability*, 16 (14), 6169. <https://doi.org/10.3390/su16146169>