



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**Revalorización del residuo (metzal) de maguey pulquero
(*Agave salmiana*) para la producción de hongo de maguey
(*Pleurotus* sp.) y cultivo de lechuga y cebada**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Vázquez Osorno Carlos Getzael

Director

Paul Misael Garza López

Codirector

Dr. Benito Flores Chávez

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo, México., mayo de 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
AGRÍCOLA Y FORESTAL SUSTENTABLE**

TESIS DE MAESTRÍA

**Revalorización del residuo (metzal) de maguey pulquero
(*Agave salmiana*) para la producción de hongo de maguey
(*Pleurotus* sp.) y cultivo de lechuga y cebada**

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

PRESENTA

Ing. Vázquez Osorno Carlos Getzael

Director

Dr. Paul Misael Garza López

Codirector

Dr. Benito Flores Chávez

Asesores

Dr. Rafael Alejandro Angel Cuapio, Dr. Oscar Arce Cervantes, Dra. Josefa
Espitia López

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo, México., mayo de 2026



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

ICAP-MCTAFS/002/2026

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

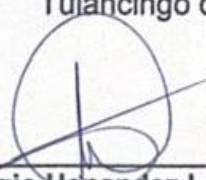
Por este conducto se le comunica que el Comité Revisor asignado al alumno **Carlos Getzael Vázquez Osorno**, de la Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable, con número de cuenta **No. 277008**, que presenta el manuscrito de tesis titulado **"Revalorización del residuo (metzal) de maguey pulquero (*Agave salmiana*) para la producción de hongo de maguey (*Pleurotus* sp.) y cultivo de lechuga y cebada"**, ha autorizado la impresión del mismo.

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

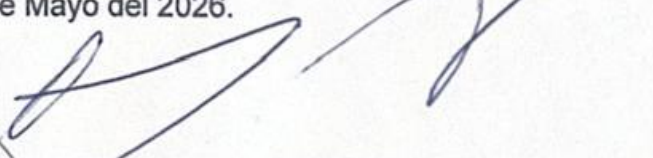
ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"

Tulancingo de Bravo, Hgo. al 12 de Mayo del 2026.


Dr. Sergio Hernández León
Coordinador de la Maestría en
Ciencias y Tecnología Agrícola y
Forestal Sustentable




Dr. Armando Peláez Acero
Director del ICAP



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

School of Forestry and Environmental Studies

Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Master's in Sciences and Technology of Agriculture and Forestry

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable

Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "Revalorización del residuo (metzal) de maguey pulquero (*Agave salmiana*) para la producción de hongo de maguey (*Pleurotus* sp.) y cultivo de lechuga y cebada.", que desarrolla el estudiante Carlos Getzael Vazquez Osomo.

Asistentes:

Dr. Rafael Alejandro Angel Cuapio

Dr. Oscar Arce Cervantes

Dra. Josefa Espitia López

Dr. Benito Flores Chavez

Dr. Paul Misael Garza López

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por Carlos Getzael Vazquez Osomo, comunicando al estudiante, realizó oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. El estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que el estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 19 de Mayo del 2026.

Dr. Rafael Alejandro Angel Cuapio

Dr. Oscar Arce Cervantes

Dra. Josefa Espitia López

Dr. Benito Flores Chavez

Dr. Paul Misael Garza López

Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda Aquetzalpa
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México; C.P. 43600
Teléfono: 771 71 72000 ext 2430
maestria_agricola_forestal@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx



Dedicatoria

A la memoria de mis queridos abuelos
José Dolores Osorno García y Eulalia Cruz Suárez,
cuya presencia sigue viva en mi corazón y en cada paso que doy.

Este trabajo de tesis les está dedicado con profunda gratitud, respeto y amor. Ustedes fueron el cimiento de mi vida, el ejemplo silencioso que me enseñó a resistir, a trabajar con dignidad y a amar el campo como se ama a la propia vida. Su legado de esfuerzo, sabiduría y afecto ha guiado mi camino incluso en los momentos más difíciles de esta investigación.

Abuelito, fuiste el artífice de mi amor por la tierra y por el maguey. Tu historia de vida, forjada desde el trabajo duro, la perseverancia y la cabalidad, es una lección que me acompaña todos los días. Me enseñaste que el trabajo nunca se termina, pero que la recompensa siempre valdrá la pena; que la palabra de un hombre es su mayor riqueza; y que la tierra se cuida, se respeta y se honra. Aunque no pasaste por las aulas, tu inteligencia, tu astucia y tu conocimiento me formaron más de lo que cualquier libro podría haber hecho. Fuiste mi abuelo, pero también mi padre, mi amigo y mi más grande ejemplo, hoy día sé que el tiempo no está para desperdiciarse.

Abuela Lalita, tú fuiste ternura, fortaleza y refugio. En tu regazo, en tu cocina y en el fogón aprendí que el amor también se transmite en forma de alimento y que el conocimiento alimenta. Me enseñaste a mirar los hongos con respeto y alegría, a colectarlos con paciencia y a disfrutarlos en familia. Tus tortillas de comal, tus memelas, tus caldos y tus quebrados siguen siendo, para mí, una obra de arte irrepetible. Me llamabas “pollito” y con ese nombre me recordabas siempre de dónde vengo. Noble, amorosa y fuerte, fuiste una mujer sabia aun sin letras, y tu ejemplo vive en mí cada vez que regreso al campo y en cada aroma que me devuelve a casa.

Esta tesis es un tributo a ambos. Mi investigación sobre el hongo del maguey nace de la unión de sus enseñanzas: del amor por el maguey que heredé de ti, abuelo, y del amor por los hongos que aprendí contigo, abuela. Así como el hongo y el maguey conviven en una relación de equilibrio y respeto, así vive en mí el legado de ustedes dos. Yo solo escribo; ustedes son los verdaderos artífices de este trabajo.

Cada recorrido, cada experimento y cada resultado llevan algo de aquellos días entre leña, pencas, aguamiel y campo abierto. Si hoy hago ciencia, es porque antes aprendí a observar la vida a su lado. Este trabajo busca compartir un fragmento de la sabiduría y el amor que me brindaron, y honrar la gran familia y los valores que construyeron.

Dondequiera que estén, sepan que aquí siguen: en el maguey, en el hongo, en el campo y en mí, con palabra firme y con la certeza de que su legado vive y seguirá vivo.

A mis padres, Gerardo Vázquez Calix y Amanda Osorno Cruz, les debo algo aún más grande que este trabajo: les debo la posibilidad misma de estar aquí.

A ti, mamá, gracias por tu mano firme y tu amor incondicional. Por enseñarme que uno puede caer, pero siempre debe levantarse. Por cuidarme incluso cuando yo no lo notaba, por poner a mis Hermanas y a mí antes que, a ti misma, por guiarme con carácter, inteligencia y una fortaleza silenciosa que sostiene familias enteras. Cuando faltaron otros pilares, tú te convertiste en el centro, en la voz firme y en el refugio. Todo lo que hoy soy lleva tu huella.

A ti, papá, gracias por el sacrificio que no se ve, pero se siente todos los días. Por irte lejos para que a nosotros no nos faltara nada. Por elegir la ausencia como forma de amor. Tu esfuerzo, tu constancia y tu alegría me enseñaron que también se puede resistir sonriendo. Aunque la distancia haya sido larga, nunca dejaste de estar presente, y sigo esperando tu regreso con el mismo cariño intacto.

Más allá del origen temático de este trabajo, su influencia fue más profunda y decisiva: formaron al hombre capaz de realizarlo. Me dieron alas sin cortarlas, incluso cuando mis decisiones parecían locuras. Me permitieron equivocarme, aprender y volver a intentar.

Vengo de un origen humilde y digno, y por eso sé que soy inmensamente rico. Rico no en lo que se presume, sino en lo que se sostiene: en el amor que no se grita, en las enseñanzas aprendidas trabajando que se quedaron en las manos y no solo en la memoria, en los sacrificios que se hacen en silencio y en los ejemplos que, aunque no siempre se nombran, cargan y dan forma a toda una vida.

Este trabajo es ciencia, es campo y es memoria.

Es sudor, es lágrima y es gratitud.

Es maguey, es hongo y es familia.

Si hoy escribo, investigo, enseño y sueño, es porque ustedes me enseñaron y me lo permitieron primero.

Esta tesis les pertenece.

Con todo mi amor, respeto y gratitud,
la dedico a quienes me dieron raíces...
y también la motivación para seguir creciendo.

Agradecimientos

A mis hermanas, Karla Dolores y Diana Geraldine

quienes han sido parte fundamental de mi vida y de mi formación como persona. Con Karla crecí aprendiendo a compartir, a cuidar y a mantenerme firme; su carácter y presencia me enseñaron desde temprano el valor de la fortaleza y la lealtad. A Diana, la menor, por su sensibilidad, disciplina y por recordarme siempre la responsabilidad de ser ejemplo y apoyo. Ambas han estado conmigo no solo en este proceso académico, sino en cada etapa de mi vida, motivándome a ser mejor y a seguir adelante. Este logro también les pertenece.

A mis asesores

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi comité tutorial y evaluador, conformado por académicos de gran calidad humana y excelencia profesional, cuya guía, compromiso y acompañamiento hicieron posible el desarrollo de este trabajo. Me considero profundamente afortunado de haber contado con un equipo que no solo aportó desde lo académico, sino que también brindó apoyo humano, confianza y orientación constante a lo largo de los distintos momentos y retos de esta investigación.

Al Dr. Benito, mi agradecimiento especial por haber sido un pilar fundamental desde mis primeros pasos en la licenciatura. Su apoyo y motivación en momentos decisivos marcaron de manera permanente mi trayectoria académica y personal, permitiéndome continuar un camino que hoy se consolida en este posgrado.

Al Dr. Paul, director de esta tesis, agradezco profundamente su guía, paciencia y forma de trabajo. Su capacidad para motivar, sugerir y acompañar con rigor y respeto ha sido determinante en mi formación. Su confianza y apertura para permitirme trabajar con autonomía, siempre bajo una orientación sólida, han fortalecido no solo este proyecto, sino también mi crecimiento profesional.

A la Dra. Josefa, agradezco su exigencia académica, su claridad intelectual y su calidad humana. Su ejemplo representa para mí una meta y un referente, y valoro profundamente la relación construida más allá del ámbito estrictamente académico.

Al Dr. Arce, le agradezco su cercanía, sus consejos oportunos y su habilidad para transmitir conocimiento desde la experiencia, facilitando el aprendizaje sin perder el rigor científico que este trabajo requiere.

Al Dr. Cuapio, agradezco su disposición, confianza y generosidad al abrirme las puertas de su laboratorio y recursos, así como su apoyo técnico y metodológico, que permitió fortalecer el desarrollo experimental de esta investigación.

A mi familia

Agradezco profundamente a mi familia por acompañarme desde mis raíces y a lo largo de mi formación personal y profesional. Cada uno ha contribuido, de manera invaluable, a mi crecimiento y al desarrollo de esta investigación. A mis tías, por brindarme un amor y una confianza que me hicieron sentir siempre como un hijo más; y a mis primos, por

compartir conmigo cada etapa de esfuerzo y aprendizaje, demostrando que la familia también se elige.

A mis amigos

A mis amigos, les agradezco su presencia y apoyo sincero. Las conversaciones compartidas fueron clave para aclarar el pensamiento y fortalecer el ánimo en momentos decisivos. Valoro profundamente la alegría genuina con la que celebran mis logros, así como yo celebro los suyos. Mi agradecimiento especial a Jessica Bivian, Erick González, Néstor León y Eliseo Hernández, por su amistad constante. De manera particular, a Gabriela de Vega, por su acompañamiento como amiga y mentora, cuyo apoyo académico y humano fue fundamental durante el desarrollo de este trabajo.

A mis alumnos

Agradezco especialmente a mis alumnos, con quienes he construido más que una relación académica. Enseñarles me ha permitido aprender más de lo que imaginé, reafirmando que compartir el conocimiento lo fortalece. Sus preguntas, ideas y curiosidad han enriquecido mi pensamiento y contribuido, de manera directa o indirecta, al desarrollo de este trabajo. Trabajar con mentes críticas y comprometidas ha sido un privilegio y una fuente constante de crecimiento e inspiración.

A SECIHTI

Por la beca otorgada No. CVU 1269674

A la Universidad Autónoma Del Estado De Hidalgo y al Instituto De Ciencias Agropecuarias

Por brindar lo necesario para obtener este logro y por permitirme ser parte de esta gran comunidad universitaria.

Agradecimiento especial

A Adilene Lugo, mi compañera de vida, expreso un agradecimiento profundo y sereno. Su presencia durante el desarrollo de este trabajo fue constante, inteligente y silenciosamente esencial. Supo acompañar sin invadir, sostener sin dirigir y comprender sin necesidad de explicación, cualidades poco comunes y de enorme valor en un proceso de esta naturaleza. En los momentos de mayor exigencia intelectual y emocional, su capacidad para leer mis silencios, respetar mis tiempos y ofrecer apoyo preciso fue un equilibrio que permitió que este trabajo avanzara con claridad y firmeza. Su aporte no se mide únicamente en acciones concretas, sino en la estabilidad, enfoque y continuidad que hizo posible sostener el ritmo y la disciplina que esta investigación demandó. Reconozco en ella una inteligencia sensible, una fortaleza discreta y una calidad humana excepcional. Este trabajo también es reflejo del acompañamiento de quien comprende la complejidad del camino y decide caminarlo a tu lado. Por ello, su presencia forma parte inseparable de esta etapa de mi vida y de lo aquí escrito.

Este trabajo no solo se construyó con datos y método, sino también con la calma, la lucidez y la presencia de quien supo estar, incluso cuando nada necesitaba ser dicho.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	II
ÍNDICE DE FIGURAS	II
ÍNDICE DE GRAFICAS	III
GLOSARIO	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCIÓN	- 1 -
AGAVE (MAGUEY)	- 1 -
MAGUEY PULQUERO	- 1 -
RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS	- 2 -
RESIDUO METZAL	- 3 -
GENERO <i>PLEUROTUS</i>	- 4 -
HONGO DE MAGUEY	- 5 -
ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	- 6 -
JUSTIFICACIÓN	- 8 -
OBJETIVOS	- 10 -
OBJETIVO GENERAL	- 10 -
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 10 -
HIPÓTESIS	- 10 -
METODOLOGÍA	- 11 -
MANEJO Y ANÁLISIS DEL RESIDUO METZAL	- 11 -
ANÁLISIS QUÍMICO-PROXIMAL DEL METZAL	- 12 -
<i>Determinación de la humedad</i>	- 12 -
<i>Determinación del contenido de cenizas</i>	- 13 -
<i>Determinación del contenido de proteína</i>	- 13 -
<i>Determinación del contenido de grasa</i>	- 14 -
<i>Determinación del contenido de fibra cruda</i>	- 15 -
<i>Medición de la CE, pH, sodio, nitrógeno, potasio y calcio del residuo metzal</i>	- 15 -
OBTENCIÓN Y PRETRATAMIENTO DE LA PAJA	- 16 -
OBTENCIÓN Y PROPAGACIÓN DEL MICROORGANISMO	- 16 -
SELECCIÓN Y PRETRATAMIENTO DE SEMILLA PARA SU INOCULACIÓN	- 17 -
INOCULACIÓN DE LA SEMILLA	- 17 -
INOCULACIÓN DEL SUSTRATO Y PROCESOS DE FRUCTIFICACIÓN DEL HONGO	- 17 -
DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA BIOLÓGICA (EB)	- 18 -
DETERMINACIÓN DE LA TASA DE PRODUCCIÓN (TP)	- 19 -
MEDICIÓN DE LAS VARIABLES EVALUADAS EN LOS TRATAMIENTOS PARA LECHUGA Y CEBADA	- 19 -
<i>Lechuga</i>	- 19 -
<i>Cebada</i>	- 20 -
ANÁLISIS SENSORIAL	- 20 -
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 22 -
CARACTERIZACIÓN QUÍMICO-PROXIMAL DEL RESIDUO METZAL DE <i>AGAVE SALMIANA</i>	- 22 -
VARIABLES EVALUADAS EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA	- 24 -
VARIABLES EVALUADAS EN LA PRODUCCIÓN DE CEBADA	- 28 -
DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA BIOLÓGICA (EB) Y LA TASA DE PRODUCCIÓN (TP) DE <i>PLEUROTUS SP.</i>	- 32 -

ANÁLISIS SENSORIAL CATA.....	- 35 -
<i>Apariencia visual (color)</i>	- 35 -
<i>Sabor</i>	- 39 -
<i>Textura en boca</i>	- 41 -
<i>Aroma</i>	- 43 -
<i>Integración sensorial: color, aroma, sabor y textura en boca</i>	- 46 -
CONCLUSIÓN	- 48 -
REFERENCIAS	- 48 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de residuos lignocelulósicos con potencial para la producción de hongos comestibles	- 2 -
Tabla 2. Descriptores sensoriales usados en el estudio CATA, Fuente: (López-Martínez et al., 2025)	- 21 -
Tabla 3. Caracterización químico-proximal del residuo metzal de Agave salmiana en muestra fresca y seca	- 22 -
Tabla 4. Propiedades químicas y contenido mineral del residuo metzal seco de Agave salmiana,- 22 -	
Tabla 5. Propiedades químicas del sustrato en el cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) en función del porcentaje de metzal incorporado	- 26 -
Tabla 6. Propiedades químicas del sustrato en el cultivo de cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) en función del porcentaje de metzal incorporado	- 31 -
Tabla 7. Prueba Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares (procedimiento de diferencia crítica de Sheskin) para los descriptores visuales con diferencias significativas evaluados mediante la metodología CATA en <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pleurotus</i> sp. (cultivado en metzal y paja)	- 36 -
Tabla 8. Prueba Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares (procedimiento de diferencia crítica de Sheskin) para los descriptores de sabor evaluados mediante la metodología CATA en <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en metzal y en paja de cebada	- 39 -
Tabla 9. Prueba Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares (procedimiento de diferencia crítica de Sheskin) para los descriptores de textura en boca evaluados mediante la metodología CATA en <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en metzal y en paja de cebada.....	- 42 -
Tabla 10. Prueba Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares (procedimiento de diferencia crítica de Sheskin) para los descriptores de aroma evaluados mediante la metodología CATA en <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en metzal y en paja de cebada	- 44 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Residuo metzal colectado para su revalorización: Imagen propia	- 4 -
Figura 2. Hongo de maguey creciendo entre las pencas de un maguey pulquero: Imagen propia - 6 -	
Figura 3. Metzal secándose a temperatura ambiente: Imagen propia	- 12 -
Figura 4. Unidades de medida HORIBA LAQUA twin del Kit Proain® para medir Sodio (Na^+ (ppm)), Nitrógeno (NO_3^- (ppm)) Potasio (K^+ (ppm)) y Calcio (Ca^{2+} (ppm)), Conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$) y Potencial Hidrogeno (pH): Imagen propia	- 16 -

Figura 5. Desarrollo de <i>Pleurotus</i> sp. en los distintos tratamientos para primer corte: Imagen propia.....	- 18 -
Figura 6. Crecimiento de raíz en los distintos tratamientos de mayor a menor	- 25 -
Figura 7. Biplot del ACP de variables de crecimiento y propiedades del sustrato en lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.).....	- 27 -
Figura 8. Biplot del ACP de las variables evaluadas en cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) bajo diferentes proporciones de metzal.....	- 31 -
Figura 9. ACM para los descriptores de apariencia visual y color de <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en metzal y en paja.....	- 36 -
Figura 10. Círculo colorimétrico empleado para la evaluación del color en hongos comestibles (Lawless & Heymann, 2010; Meilgaard et al., 2016).	- 38 -
Figura 11. ACM para los descriptores de sabor de <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en metzal y en paja de cebada, evaluados mediante la metodología CATA.....	- 40 -
Figura 12. ACM para los descriptores de textura en boca de <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en metzal y en paja de cebada, evaluados mediante la metodología CATA.	- 42 -
Figura 13. ACM para los descriptores de aroma de <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en metzal y en paja de cebada, evaluados mediante la metodología CATA.....	- 45 -

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Longitud de raíz de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) en función del porcentaje de metzal en el sustrato por tratamiento.	- 25 -
Gráfica 2. Peso fresco de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) cultivada en sustratos con diferentes proporciones de metzal por tratamiento.	- 26 -
Gráfica 3. Peso fresco de cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) en función del porcentaje de metzal en el sustrato por tratamiento.	- 28 -
Gráfica 4. Número de espigas de cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.) por tratamiento con diferentes proporciones de metzal en el sustrato por tratamiento.	- 29 -
Gráfica 5. Altura de planta de cebada en función del porcentaje de metzal en el sustrato a los 78 días de cultivo por tratamiento.	- 29 -
Gráfica 6. Número de semillas germinadas de cebada a los 78 días en diferentes porcentajes de metzal en el sustrato.	- 30 -
Gráfica 7. Eficiencia biológica de <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en sustratos con diferentes proporciones de rastrojo y metzal.	- 34 -
Gráfica 8. Tasa de producción de <i>Pleurotus</i> sp. cultivado en sustratos con diferentes proporciones de rastrojo y metzal.	- 35 -

GLOSARIO

- **ACM** – Análisis de Correspondencias Múltiples
- **ACP** – Análisis de Componentes Principales
- **ANOVA** – Análisis de varianza
- **AOAC** – *Association of Official Analytical Chemists*
- **CATA** – *Check-All-That-Apply*
- **CC** – Ciclo de cultivo
- **CE** – Conductividad eléctrica
- **EB** – Eficiencia biológica
- **ICAp** – Instituto de Ciencias Agropecuarias
- **ITS** – *Internal Transcribed Spacer*, región del ADN ribosomal utilizada para la identificación molecular de hongos
- **MTZ** – Metzal
- **PDA** – Agar papa dextrosa
- **pH** – Potencial de hidrógeno
- **SIAP** – Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
- **TP** – Tasa de producción

RESUMEN

El maguey pulquero (*Agave* spp.) genera diversos subproductos durante su aprovechamiento tradicional, entre ellos el metzal, un residuo orgánico con potencial de revalorización agrícola y biotecnológica. Asimismo, el hongo de maguey (*Pleurotus* sp.) es una especie silvestre apreciada en la gastronomía tradicional del altiplano mexicano, cuya información científica y producción controlada aún son limitadas. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el uso del metzal como sustrato alternativo para el crecimiento y fructificación de *Pleurotus* sp., así como su aplicación como enmienda orgánica en la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.), y caracterizar el perfil sensorial del hongo producido bajo diferentes condiciones de cultivo.

El hongo de maguey fue colectado de medio silvestre y propagado bajo condiciones controladas, y se evaluó su eficiencia biológica y la tasa de producción en distintos sustratos. En los cultivos agrícolas se analizaron variables de crecimiento, de biomasa y de propiedades químicas del sustrato. Adicionalmente, se realizó un análisis sensorial descriptivo mediante la metodología CATA, complementado con análisis multivariados, con el fin de comparar el hongo de maguey con una seta comercial.

Los resultados mostraron que *Pleurotus* sp. cultivado en paja presentó los mayores valores de eficiencia biológica y tasa de producción; no obstante, el cultivo en metzal permitió la formación de cuerpos fructíferos, contribuyendo a la generación de nuevo conocimiento sobre esta especie poco estudiada. En lechuga, los tratamientos con mayor proporción de metzal favorecieron el desarrollo radicular y la acumulación de biomasa fresca, mientras que en cebada se observó un mejor desempeño productivo con proporciones moderadas del residuo. En ambos cultivos, el efecto del metzal se asoció principalmente con la mejora de las propiedades físicas del sustrato más que con un aporte nutrimental directo. El análisis sensorial evidenció diferencias claras entre el hongo de maguey y la seta comercial, mientras que no se detectaron diferencias relevantes entre el hongo producido en paja y en metzal, lo que sugiere que el tipo de sustrato no modificó significativamente su perfil sensorial característico. En conjunto, los resultados indican que el metzal puede revalorizarse como sustrato y enmienda orgánica, y que el hongo de maguey conserva atributos sensoriales distintivos bajo condiciones de cultivo controladas.

ABSTRACT

Pulque maguey (*Agave* spp.) generates several by-products during its traditional use, among which metzal stands out as an organic residue with potential for agricultural and biotechnological revalorization. Additionally, the maguey mushroom (*Pleurotus* sp.) is a wild edible species highly appreciated in the traditional gastronomy of the Mexican highlands, whose scientific information and controlled production remain limited. This study aimed to evaluate the use of metzal as an alternative substrate for the growth and fructification of *Pleurotus* sp., as well as its application as an organic amendment for the production of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.), and to characterize the sensory profile of the mushroom produced under different cultivation conditions.

The maguey mushroom was collected from a wild environment and propagated under controlled conditions, evaluating biological efficiency and production rate on different substrates. In the agricultural experiments, growth variables, biomass accumulation, and chemical properties of the substrate were analyzed. In addition, a descriptive sensory analysis was conducted using the CATA methodology, support by multivariate analyses, to compare the maguey mushroom with a commercial oyster mushroom.

Results showed that *Pleurotus* sp. cultivated on straw achieved the highest biological efficiency and production rate; however, cultivation on metzal allowed the formation of fruiting bodies, contributing to the generation of new knowledge on this poorly studied species. In lettuce, higher proportions of metzal promoted root development and fresh biomass accumulation, whereas in barley, moderate proportions of the residue resulted in better productive performance. In both crops, the effect of metzal was mainly associated with improvements in the physical properties of the substrate rather than with a direct nutritional contribution. Sensory analysis revealed clear differences between the maguey mushroom and the commercial oyster mushroom, while no relevant differences were detected between mushrooms produced on straw and metzal, indicating that the substrate type did not significantly modify its characteristic sensory profile. Overall, the results support the revalorization of metzal as an organic substrate and soil amendment and highlight the potential of the maguey mushroom for sustainable production under controlled conditions.

Introducción

Agave (maguey)

El género *Agave* comprende alrededor de 310 especies distribuidas en el continente americano, de las cuales aproximadamente el 88 % se encuentran en México, lo que posiciona al país como su principal centro de diversidad y domesticación (Narváez-Suárez et al., 2016; Gentry, 1982). A pesar de ser una planta emblemática y de amplia relevancia cultural, económica y ecológica, su aprovechamiento integral ha sido limitado, principalmente debido a su crecimiento lento en comparación con otras especies vegetales de interés agrícola (Cabrera-Durán & Rosales-Ortega, 2021). Entre las especies de mayor relevancia se encuentran *Agave angustifolia*, *Agave tequiliana*, *Agave cupreata* y *Agave salmiana*, esta última ampliamente distribuida en el centro del país y asociada a sistemas tradicionales de producción de aguamiel y pulque (Figueredo-Urbina et al., 2021; García-Mendoza, 2011).

Maguey pulquero

Se estima la existencia de aproximadamente 40 especies de maguey pulquero, de las cuales, en el estado de Hidalgo, destacan *Agave atrovirens*, *Agave americana*, *Agave mapisaga* y *Agave salmiana*. Asimismo, se han descrito más de 60 variedades de magueyes pulqueros, siendo *Agave salmiana* subsp. *salmiana* la de mayor distribución, adaptabilidad e importancia productiva en la entidad, lo que ha posicionado a Hidalgo como el principal productor nacional de pulque y de superficie cultivada de maguey pulquero (Reyes-Agüero et al., 2019; Álvarez-Ríos et al., 2020; SIAP, 2020; Figueredo-Urbina et al., 2023).

Los magueyes pulqueros reciben diversas denominaciones locales, como maguey ayoteco, chalqueño, manso, púa larga o maguey blanco, las cuales varían según la región; sin embargo, todas corresponden a la especie *Agave salmiana*, reconocida como la de mayor impacto en la industria pulquera (Gentry, 1982; Figueredo-Urbina et al., 2023). De acuerdo con el SIAP (2020), Hidalgo lidera la producción nacional de maguey pulquero, superando a estados como Tlaxcala, Puebla y el Estado de México. Además, es la única entidad que reporta el aprovechamiento del maguey como alimento, en particular mediante el uso de la penca para la elaboración de barbacoa, con una superficie de 5 921 ha en producción (Trejo, 2021; García, 2023).

Residuos lignocelulósicos

La generación de residuos derivados de diversas prácticas en los sectores industrial, agrícola, pesquero, agroforestal y agroindustrial, entre otros, representa una preocupación creciente respecto a su manejo y destino final (Ozcariz-Fermoselle, et al 2018). Estos residuos pueden implicar riesgos significativos para la salud, la seguridad humana y el medio ambiente, debido a su composición química, física o a su acumulación inadecuada (EPA, 2020). Ante este panorama, resulta fundamental el trabajo multidisciplinario orientado a desarrollar estrategias que permitan su aprovechamiento, transformando las cadenas de producción en sistemas más sostenibles y resilientes, capaces de revalorizar estos materiales mediante aplicaciones responsables y con valor agregado.

Diversas investigaciones han documentado la capacidad de algunos hongos para desarrollarse sobre distintos residuos, ya sea de forma individual o en combinación, lo que ha permitido la revalorización de desechos agrícolas, forestales y agroindustriales (Rodríguez et al., 2018; Díaz et al., 2019; García et al., 2021). Estos residuos, de acuerdo con Saval (2012), pueden definirse como materiales generados a partir del consumo directo o la industrialización de materias primas y productos que no se aprovechan en su totalidad, pero cuyo remanente puede revalorizarse desde una perspectiva económica, social o comercial. En algunos casos, su disposición final representa un problema debido a los altos costos asociados a su manejo (Yepes et al., 2008).

La mayoría de los desechos generados por el sector agroindustrial presentan características lignocelulósicas, y están constituidos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que permiten su aprovechamiento como sustratos para la producción de hongos comestibles (Alonso-Gutiérrez et al., 2012; Ozcariz-Fermoselle et al., 2018; De Vega-Luttmann et al., 2021). Estos sustratos pueden clasificarse en seis rubros principales (Tabla 1) (Puig-Fernández et al., 2020).

Tabla 1. Clasificación de residuos lignocelulósicos con potencial para la producción de hongos comestibles

Clasificación	Ejemplos
Pajas	Arroz, sorgo, ajonjolí, trigo, cártamo, cebada, avena y zacate
Rastrojos	Mijo, garbanzo, maíz y frijol
Pulpas	Limón, café y cardamomo
Bagazos	Citronela, maguey, henequén, caña de azúcar, uva
Residuos forestales	Viruta, aserrín, troncos y ramas

Clasificación	Ejemplos
Otros	Desechos de la industria textil y papel, olote, fibra de coco, hojas de piña, tamo de maíz, lirio acuático, hojas y tallos de plátano

Fuente: Adaptado de Puig-Fernández et al. (2020)

Residuo metzal

Según Figueredo-Urbina et al. (2023), el metzal es un residuo orgánico generado en la industria pulquera, específicamente durante la extracción de aguamiel a partir de magueyes pulqueros (*Agave salmiana*). Este residuo se produce cuando el tlachiquero realiza el raspado del tejido interno del maguey para inducir el flujo de savia hacia una cavidad denominada cajete, lo que genera un bagazo residual con un alto contenido de fibra (hasta 70 %) y carbohidratos (hasta 20 %), confiriéndole un potencial relevante para su revalorización.

El bagazo de agave pulquero (Figura 1) ha sido conocido históricamente bajo diversas denominaciones, tales como mechal, metsal, *Xi'mfi* o metzal. Se sugiere que el término metzal tiene origen náhuatl y deriva de la palabra compuesta *Metzalli*, donde *metl* significa maguey y *tzalli* raspadura o rasgadura, aludiendo directamente a su origen y método de obtención, prácticas documentadas desde hace más de 400 años por los pueblos originarios (Sahagún, 1989; Bravo-Vargas, 2014; Ramírez-Rodríguez, 2021). En el estado de Hidalgo, México, el aprovechamiento del metzal se remonta a la época prehispánica, donde fue utilizado principalmente como alimento para animales o como combustible para fogones, debido a sus características físicas y disponibilidad local (Trejo et al., 2022; Figueredo-Urbina et al., 2023).

Durante la Revolución Mexicana (1910–1920), el metzal fue aprovechado como recurso alimenticio por las soldaderas, quienes lo mezclaban con masa para elaborar tortillas ante la escasez de maíz y otros insumos básicos. Este uso se mantuvo en algunas comunidades rurales como consecuencia de la pobreza, la disminución de la mano de obra agrícola y la limitada disponibilidad de alimentos básicos, consolidándose como un complemento y alternativa alimentaria (Figueredo-Urbina et al., 2023; Manilla, 2023).

En la actualidad, diversos estudios han evaluado el uso del metzal como sustrato para la producción de cultivos agrícolas, de hongos comestibles y como complemento alimenticio en la elaboración de productos como quesos tipo panela y platillos tradicionales. Estos trabajos han reportado resultados favorables, principalmente

asociados a su capacidad de retención de agua y su contribución a la mejora de las propiedades físicas de los sustratos (Figueredo-Urbina et al., 2023; Vázquez-Osorno et al., 2023; Hernández-Pérez et al., 2024; Guzmán-Mendoza et al., 2025).



Figura 1. Residuo metzal colectado para su revalorización: Imagen propia

Genero *Pleurotus*

El género *Pleurotus* agrupa especies de hongos comestibles de amplia distribución y relevancia económica. México es considerado uno de los países con mayor diversidad de hongos silvestres, estimándose la presencia de cientos de especies comestibles; sin embargo, los datos publicados por diversos investigadores no representan con precisión una cifra tangible del número real de especies de hongos conocidas, debido a la continua descripción de nuevas especies, variaciones morfológicas y revisiones taxonómicas (Aguirre-Acosta et al., 2014; Bonilla-Toscano, 2024).

Entre las especies mejor documentadas y de mayor importancia comercial dentro del género *Pleurotus* se encuentran *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus djamor*, que se cultivan a nivel mundial y comúnmente se conocen como setas (Aguilar-Pumahuilca et al., 2019). No obstante, la diversidad genética y ecológica del género sugiere la existencia de especies y variantes locales poco estudiadas, en particular aquellas asociadas a sustratos y a condiciones agroclimáticas específicas.

Hongo de maguey

El hongo de maguey es un basidiomiceto con características particulares, como su sabor y aroma distintivos, que recuerdan al agave. También es de difícil adquisición debido a su nula producción, ya que no existe un mercado establecido de esta especie de hongo y su recolección tiene cierto nivel de complejidad puesto que se da en la base de los agaves, como se puede observar en la Figura 2, los cuales tienen pencas con espinas y púas que hacen de difícil acceso este producto considerado como manjar del altiplano mexicano (Ramírez-Carrasco et al., 2010; Portilla-Segura et al., 2019; Vázquez-Osorno et al., 2025).

El hongo de maguey en México se ha reportado casi siempre asociado a plantas vivas de *Agave* spp., brotando de la base de la planta entre las hojas secas (Portilla-Segura et al., 2019; España-Rodríguez et al., 2021). Este hongo se caracteriza por tener un píleo plano convexo, fibroso, con coloración que va de crema a amarillo y, en algunos casos, amarillo oscuro, con un margen recto y pocas veces enrollado; presenta láminas decurrentes, blancas a color crema, estípites largos y generalmente bien desarrollados, de forma cilíndrica a claviforme, piloso en la base, y carece de velo y anillo (Barrales & Mata, 2016).

El valor nutritivo de los hongos comestibles es alto, ya que especialistas en alimentos han reportado que contienen entre 19 y 35 % de proteínas aprovechables en peso seco, en comparación con los vegetales (hortalizas y frutas), que solamente presentan entre 7.3 y 13.2 %, con excepción de la soya que alcanza hasta 39.1 % (Cano-Estrada & Romero-Bautista, 2016). Entre las especies de *Pleurotus* más conocidas se encuentran *P. ostreatus*, *P. djamora* y *P. pulmonarius*; sin embargo, a nivel rural son conocidas como orejas blancas, setas, cuernos, hongo del maguey u otros nombres dependiendo de la región. Estas especies se reproducen de manera natural sobre materia orgánica en descomposición y se ha demostrado que pueden producirse utilizando diversos desechos agrícolas y agroindustriales en ambientes controlados (Portilla-Segura et al., 2019).

Algunas investigaciones realizadas sobre el hongo del maguey lo han clasificado como *Pleurotus cornucopiae* (Paulet) Rolland, denominado así por su forma de cuerno (Valenzuela-Pérez et al., 2021), o como *Pleurotus opuntiae*; no obstante, esta última clasificación ha sido cuestionada por diversos especialistas, ya que el hongo se desarrolla

sobre plantas del género *Agave* y no sobre *Opuntia*. Estudios como los de Ramírez-Carrasco et al. (2010) y Portilla-Segura et al. (2019) sugieren que el hongo de maguey corresponde a una especie distinta dentro del género *Pleurotus*. esto se concluyó mediante el análisis molecular de la región ITS del ADNr en cepas silvestres colectadas directamente de plantas de *Agave* spp., identificándose tres sublinajes principales y cinco grupos filogenéticos, lo que evidencia una diversidad genética y morfológica asociada a condiciones agroclimáticas específicas del altiplano mexicano.



Figura 2. Hongo de maguey creciendo entre las pencas de un maguey pulquero: Imagen propia

Antecedentes y planteamiento del problema

Se estima que en el año 2013 la producción mundial de hongos comestibles y medicinales alcanzó aproximadamente 34.80 millones de toneladas. De manera paralela, en el año 2000 se reportó en México el aprovechamiento de más de 280 toneladas de residuos agrícolas, a partir de los cuales se obtuvo una producción cercana a las 30 000 toneladas de hongos (Martínez-Carrera et al., 2000; Royse & Sánchez, 2017). Estos datos reflejan la relevancia de los hongos como alternativa productiva, así como su papel estratégico en la valorización de residuos del sector agropecuario.

En las zonas pulqueras del altiplano central mexicano se genera una acumulación significativa de residuos orgánicos, particularmente el metzal, como resultado de las prácticas tradicionales de la industria pulquera. Este residuo presenta características

fisicoquímicas que lo hacen apto para su aprovechamiento como sustrato en la producción de *Pleurotus* sp. o como material texturizante del suelo en sistemas agrícolas, tal como ha sido reportado en estudios recientes (Figueredo-Urbina et al., 2023; Vázquez-Osorno et al., 2025). En este contexto, la revalorización de residuos del sector agropecuario ha cobrado interés debido a la necesidad de reducir su acumulación, minimizar impactos ambientales y generar alternativas productivas que contribuyan a la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios (Rodríguez et al., 2018; De Vega-Luttmann et al., 2021).

Diversas investigaciones han evaluado el uso de desechos agrícolas, forestales y agroindustriales, como aserrín de pino, cáscara de nuez, salvado de trigo, metzal, acícula de pino, bagazo de agave y pulpa de café, como medios de cultivo para hongos de pudrición blanca, destacando su capacidad para colonizar y degradar materiales lignocelulósicos con características favorables para el desarrollo micelial (Piña-Guzmán et al., 2016; Ozcariz-Fermoselle et al., 2019; De Vega-Luttmann et al., 2021; Guzmán-Mendoza et al., 2025). Sin embargo, la información disponible no siempre permite una caracterización precisa y homogénea de las especies involucradas, particularmente cuando se trata de hongos asociados a ambientes específicos o con antecedentes de desarrollo silvestre, lo que evidencia vacíos de conocimiento sobre su comportamiento productivo y biológico (Aguirre-Acosta et al., 2014; Bonilla-Toscano, 2024).

De manera complementaria, algunos residuos agrícolas han sido aprovechados como mejoradores físicos del suelo, aportando textura y, en algunos casos, nutrientes, lo que los convierte en una alternativa viable para el manejo de desechos orgánicos. En este sentido, se han reportado resultados favorables del uso de metzal como sustrato o enmienda en cultivos hortícolas, como el tomate, debido principalmente a su capacidad de retención de humedad y a la mejora estructural del suelo debido al incremento de espacios porosos y materia orgánica (Velázquez-De Lucio et al., 2024). Asimismo, el bagazo de agave proveniente de las industrias pulquera, tequilera y mezcalera ha sido evaluado para la producción de hongos comestibles, con resultados variables pero prometedores (España-Rodríguez et al., 2021; Hernández-Pérez et al., 2024).

Por otro lado, uno de los principales beneficios de la producción de hongos comestibles radica en el uso de sustratos de bajo costo y alta disponibilidad, generalmente residuos agrícolas a los que estos organismos presentan una elevada capacidad de adaptación. Las pajas y rastrojos de cereales, como la cebada, constituyen subproductos

ampliamente utilizados como sustrato debido a sus propiedades favorables, entre las que destacan la adecuada aireación, la retención de humedad, la lenta descomposición, el bajo costo y el fácil acceso (Saval, 2012; Díaz et al., 2019; García et al., 2021).

A pesar de estos avances, existe una limitada integración de estudios que evalúen de manera conjunta el aprovechamiento del metzal como sustrato para la producción de hongos y como enmienda orgánica en sistemas agrícolas, particularmente cuando se trata de especies de *Pleurotus* asociadas de forma natural a plantas de *Agave* spp. El hongo de maguey, de desarrollo predominantemente silvestre y con escasa producción controlada, representa un recurso biológico subaprovechado cuya caracterización productiva, agronómica y sensorial requiere ser abordada desde un enfoque experimental integral. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de generar información científica que contribuya a su revalorización, su aprovechamiento sostenible y una mejor comprensión dentro de los sistemas agropecuarios del altiplano mexicano.

Justificación

El metzal es un residuo orgánico de naturaleza lignocelulósica, constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyo manejo inadecuado limita su aprovechamiento y favorece su acumulación en las zonas pulqueras (Figueredo-Urbina et al., 2023; Hernández-Pérez et al., 2024). Tradicionalmente, este tipo de residuos se ha utilizado como fertilizante orgánico mediante procesos de compostaje, incorporándose a los suelos agrícolas con el fin de mejorar sus propiedades físicas, reducir el uso de agroquímicos y mitigar la erosión (Gallardo, 2017). No obstante, la información sobre su uso directo como sustrato agrícola o en sistemas de producción alternativos sigue siendo limitada, especialmente en cultivos de importancia regional como la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y la lechuga (*Lactuca sativa* L.).

El estado de Hidalgo concentra la mayor superficie cultivada de maguey pulquero en México, con aproximadamente 5,000 ha, lo que representa cerca del 55-60 % de la superficie nacional (SIAP, 2019; SIAP, 2023). Durante el proceso de raspado del maguey, que se realiza hasta dos veces al día, se genera un volumen considerable de metzal, estimado en alrededor de 500 g por planta al día, lo que equivale a casi 15 toneladas mensuales en regiones como Zempoala, Hidalgo. En este contexto, la revalorización de un residuo local y subutilizado representa una oportunidad para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles, capaces de fortalecer la economía rural, reducir la dependencia

de insumos externos y contribuir a la sostenibilidad alimentaria regional (Peralta et al., 2020; Figueredo-Urbina et al., 2023).

Por otro lado, los hongos comestibles del género *Pleurotus* poseen la capacidad de degradar eficientemente residuos lignocelulósicos mediante procesos enzimáticos extracelulares, involucrando complejos enzimáticos como celulasas (endoglucanasas, exoglucanasas y β -glucosidasas), hemicelulasas, y enzimas ligninolíticas como lacasas, lignino-peroxidasas y manganeso-peroxidasas, que actúan de manera sinérgica en la despolimerización de la lignocelulosa, transformando restos vegetales en biomasa comestible sin generar impactos negativos sobre el medio ambiente (Stamets, 2000). Durante su crecimiento, estos hongos degradan lignina y celulosa, lo que facilita la disponibilidad de carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales, y además permite la reutilización del sustrato agotado como enmienda orgánica para suelos agrícolas (Crespo-González et al., 2018).

El hongo de maguey, perteneciente al género *Pleurotus*, tiene un alto valor gastronómico y cultural, pero su disponibilidad es limitada debido a su crecimiento estacional y a la dificultad de su recolección en condiciones silvestres. a ello se suma la escasa información científica disponible tanto sobre esta especie como sobre el residuo metzal. En este sentido, la presente investigación se justifica por la necesidad de conservar y estudiar a *Pleurotus* sp., actualmente resguardado en la colección micológica del Instituto de Ciencias Agropecuarias, así como por generar conocimiento científico que contribuya a la revalorización integral del metzal como sustrato para la producción de hongos y como enmienda orgánica en sistemas agrícolas, fortaleciendo estrategias de aprovechamiento sostenible en el altiplano mexicano.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el residuo metzal del maguey pulquero (*Agave salmiana*) como sustrato para la producción del hongo de maguey (*Pleurotus* sp.) y como enmienda en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.).

Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar la composición del residuo metzal de maguey pulquero (*Agave salmiana*).
- ✓ Evaluar el efecto del metzal empleado como sustrato en el crecimiento y durante el desarrollo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.).
- ✓ Determinar la tasa de producción y la eficiencia biológica de *Pleurotus* sp. cultivado empleando metzal como sustrato en distintas concentraciones en combinación con paja de cebada.
- ✓ Describir las características sensoriales del hongo de maguey (*Pleurotus* sp.) y compararlas con las de una seta comercial.

Hipótesis

El residuo metzal del maguey pulquero (*Agave salmiana*), utilizado como sustrato alternativo en combinación con paja de cebada, permitirá el desarrollo y fructificación del hongo de maguey (*Pleurotus* sp.), mientras que su incorporación en mezclas con suelo agrícola mejorará las condiciones físicas del sustrato y favorecerá el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.).

Metodología

Manejo y análisis del residuo metzal

El metzal se obtuvo mediante la raspa de magueyes pulqueros situados en la región de Zempoala Hidalgo, el cual fue proporcionado por tlachiqueros de la zona. El metzal adquirido aún se encontraba en peso húmedo por lo que se le dio un tratamiento de secado mediante exposición indirecta al sol a temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) durante 48 h (Figura 3), posteriormente el residuo se homogenizó a un tamaño de partícula de 5 cm promedio con una picadora (INGAR®).

Para su uso como sustrato en la producción de setas el metzal se hidrató por 8 h y después de las primeras 4 h este se mezcló, con la finalidad de evitar fermentación en el residuo, el metzal se escurrió por 16 ± 3 h hasta llegar a una saturación del 65 ± 10 % de humedad, a continuación se colocaron en bolsas de 700 g con filtro especial para el paso de gases (Guzmán et al., 2013).

Por otro lado, el metzal que se utilizó como texturizante se dividió en las porciones requeridas (T1 100% suelo, T2 95% suelo y 5% metzal, T3 90% suelo y 10% metzal, T4 80% suelo y 20% metzal, T5 70% suelo y 30% metzal) para los distintos tratamientos según el porcentaje que se utilizó por tratamiento por lo que se aplicó la siguiente fórmula $V = Ab \times h$, donde V = Volumen, Ab = Área de la base y h = altura. para obtener el volumen del sustrato requerido por bolsa de plástico con medidas de 15 cm de radio y 35 cm de altura. Se mezcló homogéneamente con el suelo agrícola dependiendo del tratamiento, y se embolsó para la posterior siembra de las semillas de cebada, en donde se utilizaron 16 semillas por bolsa a una profundidad de 3 cm de la variedad Alicia INTA y de la plántula de lechuga, variedad Iceberg. Se trasplantó una por bolsa. (Modificado de Veloz-Badillo et al., 2019 & Veloz-Badillo et al., 2025).



Figura 3. Metzsal secándose a temperatura ambiente: Imagen propia

Análisis Químico-Proximal del metzal

Para el análisis químico-proximal de metzal se utilizó una muestra de 5 g, en peso fresco y peso seco, la determinación se realizó utilizando los métodos 925.10, 920.03, 920.39, 925.08 y 920.87 (AOAC, 2000), para la medición del contenido de: humedad, cenizas, grasa, fibra cruda y proteína respectivamente (cada análisis se realizó por triplicado) así mismo se midieron pH, CE y algunos macroelementos (HORIBA Advanced Techno [HORIBA], s.f.; Badui-Dergal, 2006; Méndez Ventura, 2020).

Determinación de la humedad

La humedad del metzal se calculó por método de secado por estufa, por lo que se pesó la muestra en una charola de aluminio previamente tarada y llevada a peso constante en una estufa (TERLAB®) por aproximadamente 40 min, después se agregó el metzal y se repitió el procedimiento, pero ahora por 4 h a una temperatura de 105°C, o hasta peso constante, posteriormente la charola se colocó en un desecador por 30 min para llegar a temperatura ambiente y así poder pesar y determinar el contenido de humedad por diferencia de pesos, con la fórmula; (AOAC, 2012); 925.09.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{B - A}{PM} * 100$$

Donde:

B= peso de la charola con la muestra

A= peso de la charola con la muestra seca

PM= peso de la muestra

Determinación del contenido de cenizas

Para determinar el contenido de cenizas se usó el método gravimétrico por lo que la muestra de 5 g se pesó en crisoles, los cuales se llevaron a un peso constante en una estufa de secado a 110°C durante 12 h, posteriormente las muestras fueron calcinadas en una mufla Lindberg® (TPS Thermo products Solutions Riverside®, MI, USA), hasta llegar a una temperatura de 550°C durante 4h y se dejó enfriar a temperatura ambiente en un desecador para posteriormente ser pesados (AOAC, 2009); 923.03. El contenido de cenizas se calculó con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{B - A}{PM} * 100$$

Donde:

B= peso del crisol con cenizas

A= peso del crisol

PM= peso de la muestra

Determinación del contenido de proteína

Para la determinación del contenido de proteína se usó el método Kjeldahl (AOAC, 2019): 920.123, se pesaron 0.5 g del metzal en papel libre de nitrógeno, posteriormente se colocó en un matraz Kjeldahl al cual se le añadieron 20 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado y una pastilla digestora. Después, los matraces se colocaron en el digestor de Kjeldahl hasta que el nitrógeno orgánico se transformó en ión amonio y se dejaron enfriar los matraces para adicionar 20 mL de agua destilada. Posteriormente en un tubo refrigerante se colocó el matraz Erlenmeyer con 50 mL de ácido butírico (C₄H₈O₂) al 2% y se adicionaron 2 gotas de rojo de metilo.

Asimismo se realizó la destilación en un destilador (BUCHI®), para después llevar a cabo una titulación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 0.1N (AOAC, 2019): 920.123, y los resultados se calcularon con la siguiente fórmula:

$$\%N = \frac{(\text{mL problema } H_2SO_4 - \text{mL blanco } H_2SO_4)(\text{meq N})(N \text{ del } H_2SO_4)}{\text{peso real de la muestra}} * 100$$

$$\% \text{ Proteína} = (\%N) (6.25)$$

El factor de 6.25 variará dependiendo del alimento

Volumen gastado por la muestra problema mL

Volumen gastado por el blanco mL

Normalidad del ácido N

Peso de la muestra en gramos g

Determinación del contenido de grasa

Para obtener el contenido de grasa se aplicó el método Goldfish, por lo que se usaron unos vasos de extracción los cuales se colocaron en una estufa hasta peso constante (105°C durante 12 h), y se colocaron las muestras secas de metzal dentro de cartuchos de celulosa que se taparon con algodón. Asimismo, se colocaron en el equipo de extracción en donde se utilizaron 100 mL de éter de petróleo aproximadamente, de acuerdo con el método Soxhlet con una extracción automática Büchi, Extraction System B-811 (Büchi®Labortechnik AG, Flawill, Suiza) por 3 h de extracción, 30 min de lavado y 30 min de secado. Posteriormente el cartucho de celulosa y los vasos de extracción se colocaron en la estufa de secado para evaporar el solvente residual (2 h), posteriormente se colocaron en un desecador (24 h), después se pesaron en una balanza analítica y el contenido de grasa se determinó con la siguiente fórmula (AOAC, 2010); 920.39:

$$\% \text{ de lípidos} = \frac{B - A}{PM} * 100$$

Donde:

B= peso del vaso con grasa

A= peso del vaso

PM= peso de la muestra

Determinación del contenido de fibra cruda

El contenido de fibra cruda se determinó con un extractor de fibra (LABCONCO®), pesando 0.5 g de la muestra inicial ya desengrasada la cual se colocó en un vaso de Berzelius de 600 mL al cual se le añadieron 200 mL de H₂SO₄ 0.225 N en punto de ebullición, posteriormente se colocó en el aparato de digestión manteniendo en ebullición suave (30 min), se filtró y se lavó el residuo con agua a una temperatura de 100°C para llegar a pH neutro, el residuo se transfirió a un vaso Berzelius, donde se colocaron 200 mL de solución de NaOH 0.313 N (120°C), los vasos se colocaron nuevamente en el equipo de digestión, (120°C, 30 min). La muestra se filtró y se lavó con 25 mL de H₂SO₄ 0.225 N, se filtró y lavó tres veces con agua destilada (120°C), con 25 mL de alcohol absoluto, las muestras se secaron en crisoles en la estufa de secado (TERLAB®) (130°C, 2 h), se dejó enfriar. Posteriormente, las muestras se pesaron y colocaron en una mufla (TERLAB®) donde se calcinaron las muestras (550°C, 4 h). Posteriormente, se permitió el descenso de temperatura en un desecador para pesar (AOAC, 2010); 962.09. Los resultados se obtuvieron con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de fibra cruda} = \frac{(\text{peso del crisol con la muestra seca} - \text{peso del crisol con la muestra calcinada})}{\text{peso real de la muestra}} * 100$$

Medición de la CE, pH, sodio, nitrógeno, potasio y calcio del residuo metzal

Asimismo, se evaluó el contenido de sodio (Na⁺ ppm), nitrógeno (NO₃⁻ ppm), potasio (K⁺ ppm) y calcio (Ca²⁺ ppm) y las propiedades químicas; conductividad eléctrica (CE, µS/cm) y potencial hidrógeno (pH). Para lo que se tamizó el residuo seco a 200 mesh, obteniendo un polvo de metzal del cual se ocuparon 10 g que se diluyeron en 10 mL de agua destilada, la muestra se mezcló hasta tener una solución homogénea y se dejó reposar por 30 min para evitar sólidos suspendidos, una vez que la solución dejó de presentar turbidez se colocó una muestra representativa de 1.25 mL en las unidades de medida (HORIBA LAQUA twin®) previamente calibradas del Kit Proain® (Figura 4) según las indicaciones de uso del fabricante (HORIBA, s.f.; Hernández-Pérez et al., 2024)



Figura 4. Unidades de medida HORIBA LAQUA twin del Kit Proain® para medir Sodio (Na^+ (ppm)), Nitrógeno (NO_3^- (ppm)) Potasio (K^+ (ppm)) y Calcio (Ca^{2+} (ppm)), Conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$) y Potencial Hidrogeno (pH): Imagen propia

Obtención y pretratamiento de la paja

La paja de cebada se adquirió de una forrajera local en el Municipio de Tulancingo de Bravo Hidalgo, la cual se homogenizó a un tamaño de partícula de 5 ± 2 cm con una trituradora de disco (Siemens®). Asimismo, se hidrató por 12 h donde después de transcurridas 6 h se volteó la paja, al término de ello se dejó escurrir por 12 ± 3 h hasta llegar a una saturación promedio del 65 ± 10 %, la paja se embolsó para los distintos tratamientos (Gaitán-Hernández et al., 2006; Gaitán-Hernández & Silva Huerta 2016).

Obtención y propagación del microorganismo

El hongo de maguey (*Pleurotus* sp.) se colectó de una planta viva de *Agave salmiana*, localizada en una zona rural del Municipio de Zempoala Hidalgo, Dirección Plus Code: (W884+G9V Zempoala, Hidalgo). Posteriormente en el laboratorio de plagas agrícolas de la UAEH del ICAP se realizó la siembra y aislamiento de la cepa según la metodología de Guzmán et al. (2013), quedando en resguardo de la colección de hongos del Cuerpo Académico de Agrobiotecnología. Una vez purificada se inoculó en medio papa dextrosa agar (PDA) pesando 39 g/L en placas de Petri de 90 mm. las cuales se incubaron en oscuridad durante 14 días a 24°C de acuerdo con la metodología de Guzmán et al. (2013).

Selección y pretratamiento de semilla para su inoculación

Se utilizó semilla de sorgo debido a la morfología, disponibilidad y propiedades nutritivas de esta para la producción de micelio (Guzmán et al., 2013; Gaitán-Hernández & Silva Huerta 2016). Estas fueron sometidas a un proceso de limpieza para eliminar cualquier partícula extraña, mediante enjuagues continuos con agua. Posteriormente, se sumergieron por un período de 24 h con un cambio de agua a las 12 h para evitar fermentaciones, hasta lograr una hidratación del $70 \pm 10 \%$, se eliminó el exceso de agua y las semillas se colocaron en frascos de vidrio, con una capacidad de un litro, llenando 2/3 de su capacidad con las semillas hidratadas. Asimismo, estos fueron esterilizados en una autoclave a 121°C por un período de 40 min y al término del tiempo, se dejó enfriar para su posterior inoculación (Guzmán et al., 2013).

Inoculación de la semilla

La inoculación se realizó en una campana de flujo laminar en donde se tomó el inóculo de las cajas Petri previamente invadidas por micelio, para propagarlo en el sorgo (semilla madre), posteriormente se colocó en frascos los cuales contenían semilla madre y se colocaron en condiciones de oscuridad por aproximadamente dos semanas a una temperatura ambiente de $24 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Asimismo, una vez invadida toda la semilla madre se tomó el micelio como inóculo y se repitió el proceso para generar semilla secundaria (Guzmán et al., 2013).

Inoculación del sustrato y procesos de fructificación del hongo

Se realizaron 4 tratamientos con los residuos paja y metzal (T1 100% paja, T2 65% paja y 35% metzal, T3 50% paja y 50% metzal, y T4 100% metzal) con 7 repeticiones cada uno, para el análisis de datos se utilizó un diseño experimental completamente al azar y los datos se analizaron por un ANOVA con el programa (XLSTAT by Lumivero®, 2024) y las diferencias significativas se obtuvieron con la prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0.05$), (García-Villalpando et al., 2001; Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. 2008).

Los residuos previamente esterilizados se colocaron en bolsas plásticas para la elaboración de los sustratos de cada tratamiento y estas se estandarizaron a un peso promedio de 620 g, las cuales se llevaron a esterilizar en una autoclave (121°C , 1 h). Asimismo, se permitió el descenso de la temperatura para su posterior inoculación, por

lo que se llevaron a una campana de flujo laminar donde se agregaron 30 g de semilla secundaria por bolsa, se les colocó un filtro de polipropileno de 5 micras previamente esterilizado el cual sirve para permitir el intercambio gaseoso (O_2 y CO_2), se rotularon y colocaron en oscuridad a una temperatura ambiente de 23 ± 3 °C por 13 d, que posteriormente se colocaron en estantes de plástico en un cuarto de incubación previamente adaptado con las condiciones adecuadas para la producción de setas en donde la humedad se mantenía entre el 75 y 85 % con ayuda de un humidificador (SHINOBI® MODELO: SH-1001) y a una temperatura de 20 a 25°C. Una vez que se formaron los primordios se retiraron los tapones de los filtros para permitir el desarrollo de los cuerpos fructíferos del primer corte como se observa en la Figura 5. Para el segundo y tercer corte se revisaron las bolsas diariamente para identificar la formación de primordios dentro de las bolsas y con ayuda de un bisturí estéril, se realizaron cortes que permitieran su óptimo crecimiento. Los hongos colectados se pesaron en una balanza analítica y se recabaron datos para su posterior análisis (Gaitán-Hernández et al., 2006; Guzmán et al., 2013).



Figura 5. Desarrollo de *Pleurotus* sp. en los distintos tratamientos para primer corte: Imagen propia

Determinación de la eficiencia biológica (EB)

En la EB se registró el peso de cada cosecha en g y el peso del sustrato seco y al finalizar el experimento se calculó la EB para lo cual se tomaron los valores de las 3 cosechas de todas las repeticiones de cada tratamiento. La eficiencia biológica (EB) se define como

un índice de rendimiento de los hongos en función del peso fresco de los cuerpos fructíferos respecto al peso seco del sustrato, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia Biológica (EB)} = \frac{\text{Peso del hongo Fresco}}{\text{Peso del sustrato seco}} * 100$$

(De Bonis, Pecchia, & Nicoletto, 2026).

Peso fresco: Promedio del peso de las cosechas realizadas en cada tratamiento.

Determinación de la tasa de producción (TP)

En la TP, según Royse y Sánchez (2017), relaciona la EB y el tiempo en días en el cual se cumple un ciclo de cultivo, por lo que la TP se determinó de acuerdo con lo propuesto por Royse (1989) para lo cual se utiliza la siguiente fórmula.

$$\text{Tasa de Producción (TP)} = \frac{\text{EB \%}}{\text{CC}}$$

EB%: Eficiencia biológica en porcentaje

CC: Ciclo de cultivo, este se determinó desde la inoculación del sustrato, la colonización y hasta el período de fructificación (cosecha) en días.

Medición de las variables evaluadas en los tratamientos para lechuga y cebada

Se realizaron 5 tratamientos con el residuo metzal en distintas concentraciones (T1 100% suelo, T2 95% suelo y 5% metzal, T3 90% suelo y 10% metzal, T4 80% suelo y 20% metzal, T5 70% suelo y 30% metzal) con 5 repeticiones cada uno, Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó un diseño completamente al azar y los datos se analizaron mediante ANOVA con la prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha=0.05$) (García-Villalpando et al., 2001; Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. 2008). Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para identificar las tendencias de comportamiento entre los distintos tratamientos y las variables, (XLSTAT by Lumivero® 2023.1).

Lechuga

Para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) a los 70 días del trasplante, se evaluaron las variables: peso fresco (kg), longitud de la raíz (cm) con un flexómetro y en el sustrato se evaluó el contenido de Na^+ (ppm), Ca^{2+} (ppm), NO_3^- (ppm) y K^+ (ppm) y las

propiedades químicas; CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y pH, para lo que se tamizó el sustrato a 200 mesh, del cual se ocuparon 10 g que se diluyeron en 10 mL de agua destilada, se mezcló la muestra y se dejó reposar por 30 min para evitar sólidos suspendidos y una vez que la solución dejó de presentar turbidez se colocó una muestra representativa de 1.25 mL en las unidades de escrutinio previamente calibradas del Kit Proain®, según las indicaciones de uso del fabricante (HORIBA, s.f).

Cebada

Para el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*) se colocaron 16 semillas por bolsa, y a los 120 días de la siembra, se midieron las siguientes variables: peso fresco (kg) con una báscula, altura (cm) con un flexómetro, germinación (%), el número de espigas y las variables de pH, CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$), y concentraciones de Na^+ , Ca^{2+} , NO_3^- y K^+ en ppm, para lo que se tamizó el sustrato a 200 mesh, del cual se ocuparon 10 g que se diluyeron en 10 mL de agua destilada, se mezcló bien la muestra y se dejó reposar por 30 min para evitar sólidos suspendidos y una vez que la solución dejó de presentar turbidez se colocó una muestra de 1.25 mL en las unidades de medida previamente calibradas del Kit Proain®, según las indicaciones de uso del fabricante (HORIBA, s.f).

Análisis sensorial

Se realizó un estudio sensorial en el que se aplicó la metodología Check-All-That-Apply (CATA) (Damiani, 2021) con el programa estadístico (XLSTAT by Lumivero®. 2024). Con 50 jueces no entrenados, de los cuales 23 fueron mujeres y 27 hombres, con una edad promedio de 22.8 años, a quienes se les explicó, previo al análisis, cómo distinguir sensorialmente los atributos que se analizaron, los cuales se agruparon en 4 categorías: sabor, aroma, color y textura, como se muestra en la Tabla 2. se les entregó una lista de atributos de donde los jueces seleccionaron todos aquellos que percibieron para cada muestra de hongo (Zhuang, 2020; López-Martínez et al., 2025), Y para poder describir al hongo de maguey producido en metzal y paja de cebada, así como una seta comercial (*Pleurotus ostreatus*) (MONTE BLANCO®) se les proporcionó una muestra de aproximadamente 1 cm^2 a cada juez así como una botella de agua para poder limpiar el paladar entre muestras y un tenedor desechable para prevenir cualquier contaminación (Severiano-Pérez, 2019; López-Martínez et al., 2025).

Tabla 2. Descriptores sensoriales usados en el estudio CATA, Fuente: (López-Martínez et al., 2025)

Color	Apariencia externa, uniformidad de color, textura aterciopelada, apariencia interna, color diferente al externo.
Aroma	Ahumado, mantecoso/grasa, amaderado, seta fresca, dulce, nueces, metálico, hierba, cítrico, frutal, malta, acre, anís, floral, harina húmeda, descomposición, miel, albaricoque, almendra, terroso, rancio.
Sabor	Fuerte, ligero, insípido, amargo, dulce, salado, umami, mariscos, astringencia, metálico, zanahoria cocida, acre, anís, almendras, nueces, picante, berros, pollo.
Textura en boca	Crujiente, suave, duro, fibroso, polvoriento, carnosos, gelatinoso.

Asimismo, se determinó si los jueces detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las muestras para cada descriptor, lo cual se estableció mediante la prueba Q de Cochran (Aslam, 2023), en la que se empleó el software XLSTAT® 2024.4 Sensory. Adicionalmente, se realizó un análisis de correspondencias múltiples (ACM) (Greenacre, 2017), el cual se obtuvo mediante una matriz indicadora, codificada como variable binaria; en este análisis se estableció 1 cuando los jueces seleccionaron un atributo para describir cada muestra correspondiente y 0 cuando no lo seleccionaron.

Resultados y discusión

Caracterización químico-proximal del residuo metzal de *Agave salmiana*

Los resultados del análisis químico-proximal del residuo metzal de *Agave salmiana*, evaluado en muestra fresca y seca, se presentan en la Tabla 3. El contenido de humedad en la muestra fresca fue de 78.94 %, mientras que en la muestra seca disminuyó a 16.71 %, lo que refleja una alta capacidad de retención de agua del residuo, un comportamiento habitual en residuos lignocelulósicos con alta proporción de materias estructurales como celulosa y hemicelulosa (Chairez-Aquino et al., 2015; España Rodríguez et al., 2021). La materia seca correspondió a 21.05 % en la muestra fresca y a 83.28 % en la muestra seca.

Tabla 3. Caracterización químico-proximal del residuo metzal de *Agave salmiana* en muestra fresca y seca

Componentes (%)	Muestra fresca	Muestra seca
Humedad	78.94	16.71
Sólidos totales	21.05	83.28
Cenizas	1.37	4.58
Grasa	0.63	1.27
Fibra cruda	0.59	2.72
Proteína	1.14	5.32
Carbohidratos	17.30	69.37

Nota: Valores expresados en porcentaje (%), correspondientes al promedio de tres repeticiones analíticas.

En cuanto a la composición proximal del metzal seco, se registró un contenido de cenizas de 4.58 %, grasa de 1.27 %, fibra cruda de 2.72 % y proteína cruda de 5.32 %. El residuo presentó un pH ligeramente ácido (5.0) y una conductividad eléctrica de 653 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Respecto al contenido nutrimental, se determinaron concentraciones de 12 ppm de nitratos (NO_3^-), 61 ppm de calcio (Ca^{2+}), 95 ppm de potasio (K^+) y 6 ppm de sodio (Na^+) en el extracto del residuo seco (Tabla 4).

Tabla 4. Propiedades químicas y contenido mineral del residuo metzal seco de *Agave salmiana*,

Parámetro	Valor
pH	5.00
CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	653.00
NO_3^- (ppm)	12.00
Ca^{2+} (ppm)	61.00
K^+ (ppm)	95.00
Na^+ (ppm)	6.00

Nota: Los valores de pH, CE y concentraciones de iones se determinaron a partir de una suspensión preparada con residuo metzal seco y agua destilada, siguiendo el procedimiento descrito en la metodología.

Las mediciones se realizaron con sensores portátiles HORIBA LAQUAtwin® previamente calibrados conforme a las recomendaciones del fabricante (HORIBA, s.f.).

La caracterización químico-proximal del metzal de *Agave salmiana* evidencia que se trata de un residuo con naturaleza predominantemente lignocelulósica y alto contenido de humedad, características que han sido reportadas previamente para subproductos derivados del aprovechamiento del maguey pulquero y otros residuos de agave empleados como sustratos alternativos en la producción de hongos comestibles (Chairez-Aquino et al., 2015; España-Rodríguez et al., 2021).

El elevado contenido de humedad observado en la muestra fresca sugiere una alta capacidad de retención de agua, lo cual puede resultar favorable en sistemas que requieren mantener condiciones hídricas estables, por ejemplo, durante la fase inicial de colonización micelial de *Pleurotus* sp. (España Rodríguez et al., 2021). No obstante, esta misma característica puede representar una limitación operativa, ya que un exceso de humedad puede afectar la aireación del sustrato o del suelo si no se combina adecuadamente con materiales estructurales más secos, como pajas o residuos con mayor porosidad (Chairez-Aquino et al., 2015).

La composición proximal del metzal seco, particularmente los bajos contenidos de grasa y proteína cruda, confirma que se trata de un residuo con limitada disponibilidad nutrimental en comparación con sustratos agrícolas tradicionales como la paja de cereales. Estudios previos han señalado que los residuos de agave presentan concentraciones reducidas de nitrógeno total y de proteína cruda, lo que puede restringir el desarrollo biológico cuando se utilizan como sustratos únicos, lo que hace necesaria su combinación o suplementación para mejorar el desempeño productivo en cultivos de hongos o en sistemas agrícolas (España Rodríguez et al., 2021).

El contenido de fibra cruda y cenizas es consistente con lo reportado para residuos lignocelulósicos utilizados en la producción de *Pleurotus* spp., los cuales proporcionan una matriz estructural adecuada para el crecimiento micelial, aunque no garantizan por sí mismos altos rendimientos productivos (Chairez-Aquino et al., 2015). En este sentido, investigaciones previas han documentado que el bagazo de agave puede sostener el crecimiento y fructificación de *Pleurotus*, pero con eficiencias biológicas variables y, en algunos casos, inferiores a las obtenidas con sustratos convencionales como la paja de cebada (España Rodríguez et al., 2021).

El pH ligeramente ácido del metzal se encuentra dentro del rango tolerado por *Pleurotus* spp. y por diversos microorganismos del suelo, lo que sugiere que este residuo no representa una barrera química para su uso en sistemas biológicos, de manera similar, la conductividad eléctrica registrada se considera moderada y no indica un riesgo inmediato de salinidad; sin embargo, su efecto depende de la proporción de metzal incorporada y del sistema productivo específico (Chairez-Aquino et al., 2015).

En cuanto al contenido mineral, la presencia de potasio y calcio indica que el metzal puede aportar ciertos elementos esenciales, aunque en concentraciones que no permiten considerarlo una fuente nutrimental completa. Por lo tanto, su función dentro de los sistemas evaluados parecen estar más relacionados con su aporte estructural y físico que con un suministro significativo de nutrientes (España Rodríguez et al., 2021).

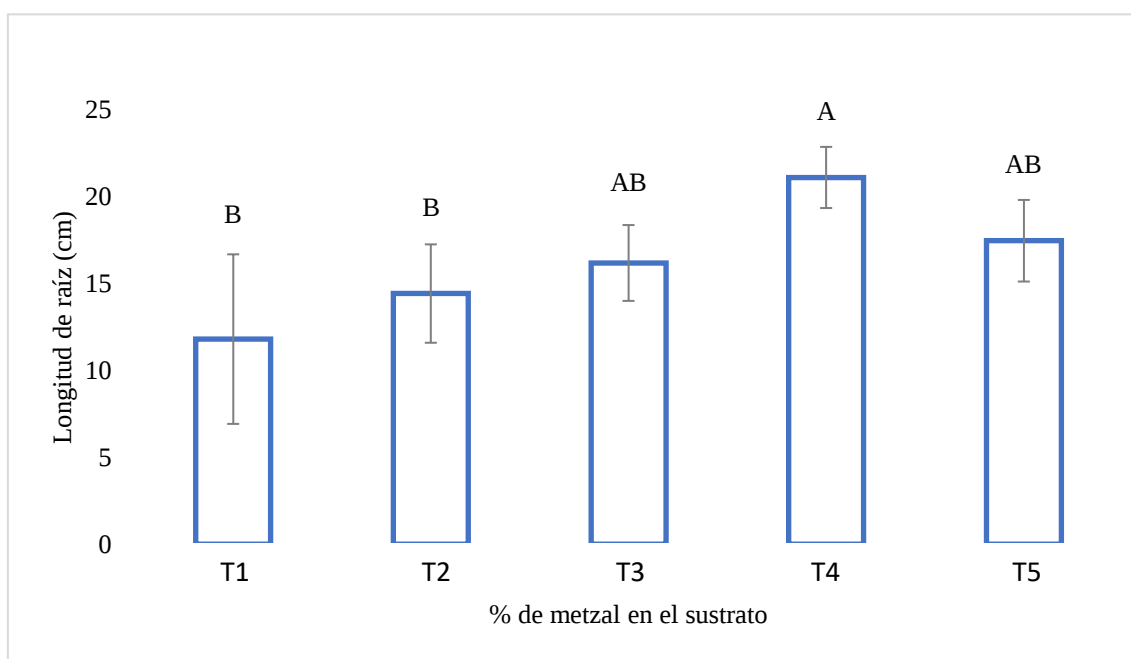
En conjunto, los resultados indican que el metzal de *Agave salmiana* presenta potencial de uso como componente de sustratos o como material texturizante del suelo, aunque con limitaciones claras derivadas de su baja concentración nutrimental, lo que permite interpretar de manera coherente que, en las evaluaciones productivas posteriores, el metzal no siempre generó respuestas superiores frente a otros tratamientos, pero sí contribuyó de forma específica en ciertos parámetros físicos y biológicos del sistema

Variables evaluadas en la producción de lechuga

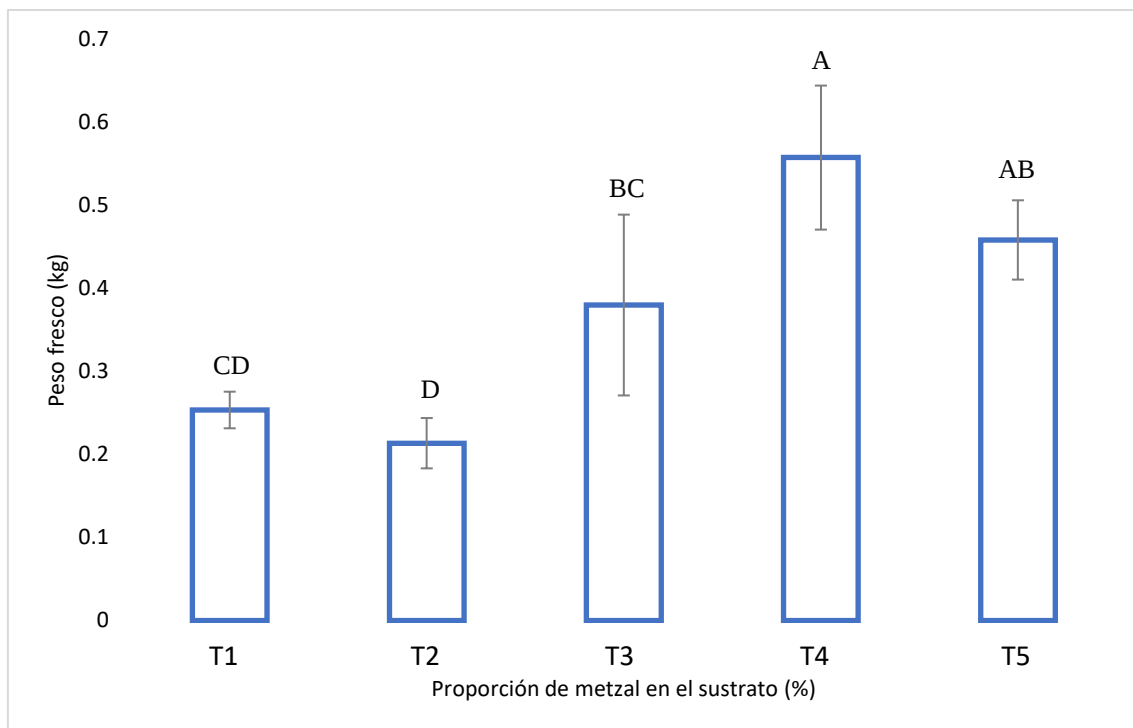
En el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.), el tratamiento T4 (20 % de metzal) presentó los valores más altos de longitud de raíz (21.1 cm) y peso fresco (0.557 kg), significativamente superiores al resto de los tratamientos ($p < 0.05$), como se muestra en la Figura 6 y en las Gráficas 1 y 2. Estos resultados indican que la incorporación intermedia de metzal favoreció el desarrollo radicular y el incremento del peso fresco del cultivo, sin que ello implique necesariamente un mayor aporte nutrimental directo.



Figura 6. Crecimiento de raíz en los distintos tratamientos de mayor a menor



Gráfica 1. Longitud de raíz de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en función del porcentaje de metzal en el sustrato por tratamiento. **Nota.** Los valores representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Barras con letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, $p < 0.05$).



Gráfica 2. Peso fresco de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivada en sustratos con diferentes proporciones de metzal por tratamiento. **Nota.** Las barras representan el valor medio $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA y prueba de Tukey, $p < 0.05$).

El resto de las variables evaluadas en el sustrato (pH, CE, NO_3^- , Ca^{2+} , K^+ y Na^+) no presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), como se observa en la Tabla 5. Este comportamiento sugiere que el metzal no actuó como fuente nutrimental directa, sino principalmente como modificador de las propiedades físicas del sustrato. Resultados similares han sido reportados para otros materiales orgánicos estructurales utilizados en agricultura, como la fibra de coco, cuyo efecto sobre el crecimiento vegetal se asocia principalmente a la mejora de la aireación, la retención de humedad y la estructura del medio radical, más que a un incremento en la disponibilidad de nutrientes debido a su contenido mayormente lignocelulósico (Abad et al., 2002; Martínez-Gutiérrez et al., 2005).

Tabla 5. Propiedades químicas del sustrato en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en función del porcentaje de metzal incorporado

parámetro	% de metzal en el sustrato				
	0	5	10	20	30
pH	7.96 ± 0.09^A	8.00 ± 0^A	7.60 ± 0.14^A	7.80 ± 0.40^A	7.62 ± 0.16^A
CE ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	1547 ± 232^A	1130 ± 185^A	985 ± 74^A	1190 ± 310^A	1010 ± 186^A
NO_3^- (ppm)	328.0 ± 99^A	214.0 ± 20^A	170.0 ± 18^A	190.0 ± 25^A	236.0 ± 51^A
Ca^{2+} (ppm)	186.00 ± 60^A	136.00 ± 15^A	132.00 ± 13^A	156.00 ± 37^A	156.00 ± 29^A
K^+ (ppm)	34.40 ± 11^A	34.40 ± 3^A	39.60 ± 3^A	61.80 ± 23^A	51.20 ± 14^A
Na^+ (ppm)	158.00 ± 32^A	155.80 ± 37^A	116.00 ± 18^A	111.80 ± 19^A	90.20 ± 4^A

Nota: Los valores corresponden a la media $\pm$ desviación estándar. Letras iguales en la misma fila indican ausencia de diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA, prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$). El pH es adimensional.

Por otro lado, el ACP, empleado como análisis exploratorio, permitió identificar tendencias de asociación entre las variables evaluadas y los tratamientos. En la Figura 7, los dos primeros componentes explicaron en conjunto el 88.69 % de la variabilidad total, lo que indica una adecuada representación de los datos. Se observa que el peso fresco, la longitud de raíz y la concentración de K^+ se asociaron principalmente con los tratamientos T3, T4 y T5, mientras que las variables químicas del sustrato (pH, CE, NO_3^- , Ca^{2+} y Na^+) se relacionaron con T1 y T2. Estas asociaciones sugieren que, conforme aumenta la proporción de metzal en el sustrato, su efecto se manifiesta principalmente en variables de crecimiento vegetal, más que en cambios químicos detectables, lo cual coincide con lo reportado en estudios donde residuos lignocelulósicos se emplean como mejoradores físicos del medio de cultivo (Crespo-González et al., 2018; Singh et al., 2022).

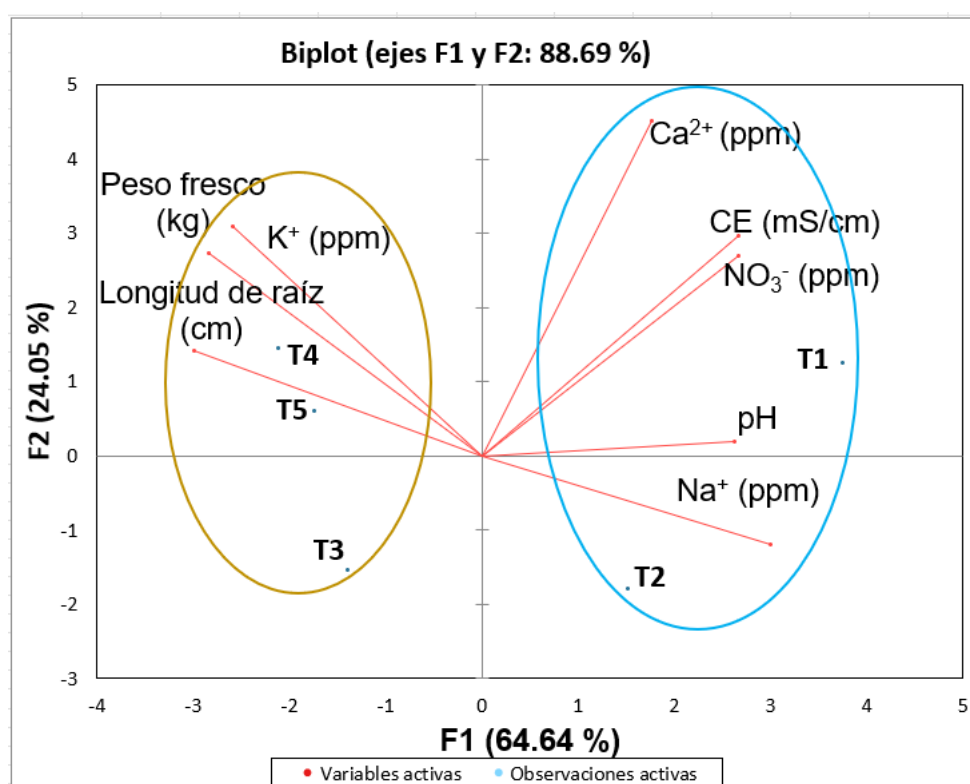


Figura 7. Biplot del ACP de variables de crecimiento y propiedades del sustrato en lechuga (*Lactuca sativa* L.).

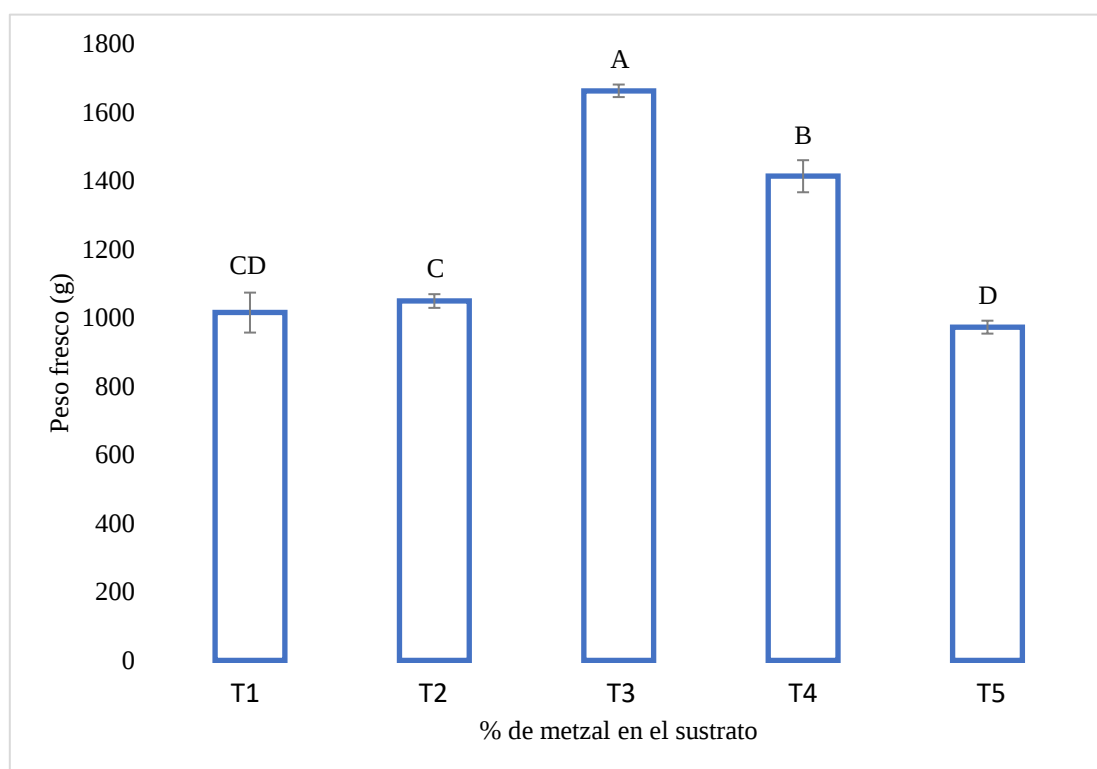
Nota. El biplot representa el resultado del ACP realizado con las variables de crecimiento de la lechuga (peso fresco y longitud de raíz) y las propiedades químicas del sustrato (pH, CE y concentraciones de Na^+ , Ca^{2+} , NO_3^- y K^+). Los tratamientos (T1–T5) se muestran como observaciones activas y las flechas corresponden a las variables activas. La dirección y longitud de las flechas indican la contribución de cada variable a los ejes principales, mientras que la proximidad entre tratamientos y variables refleja su grado de asociación. Los dos primeros componentes (F1 y F2) explicaron conjuntamente el 88.69 % de la variabilidad total de los datos.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el metzal puede contribuir al desarrollo de lechuga cuando se incorpora en proporciones intermedias (20%),

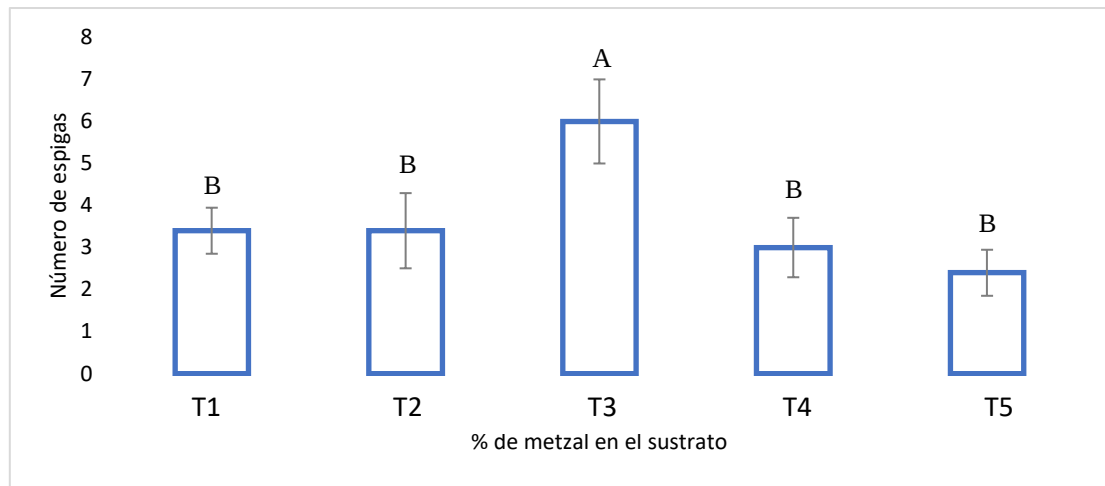
principalmente por su efecto físico sobre el sustrato, sin que ello implique una mejora generalizada en los parámetros químicos evaluados.

Variables evaluadas en la producción de cebada

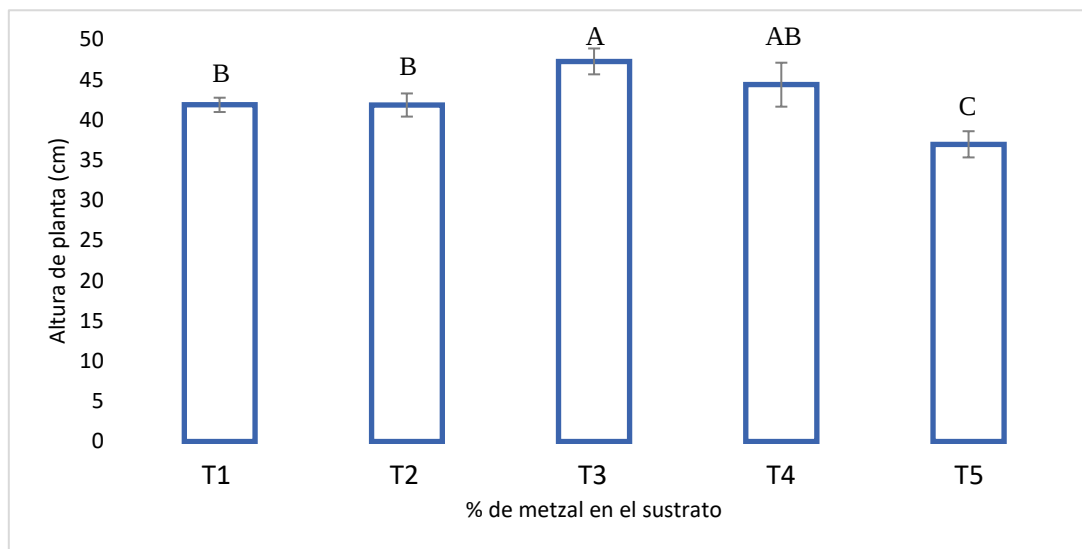
En el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.), se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en las variables de peso fresco, altura de planta y número de espigas ($p < 0.05$). En particular, el tratamiento con 10 % de metzal (T3) presentó los valores más altos de peso fresco (0.33 kg), altura de planta (47.28 cm) y número de espigas, como se muestra en las Gráficas 3 a 6.



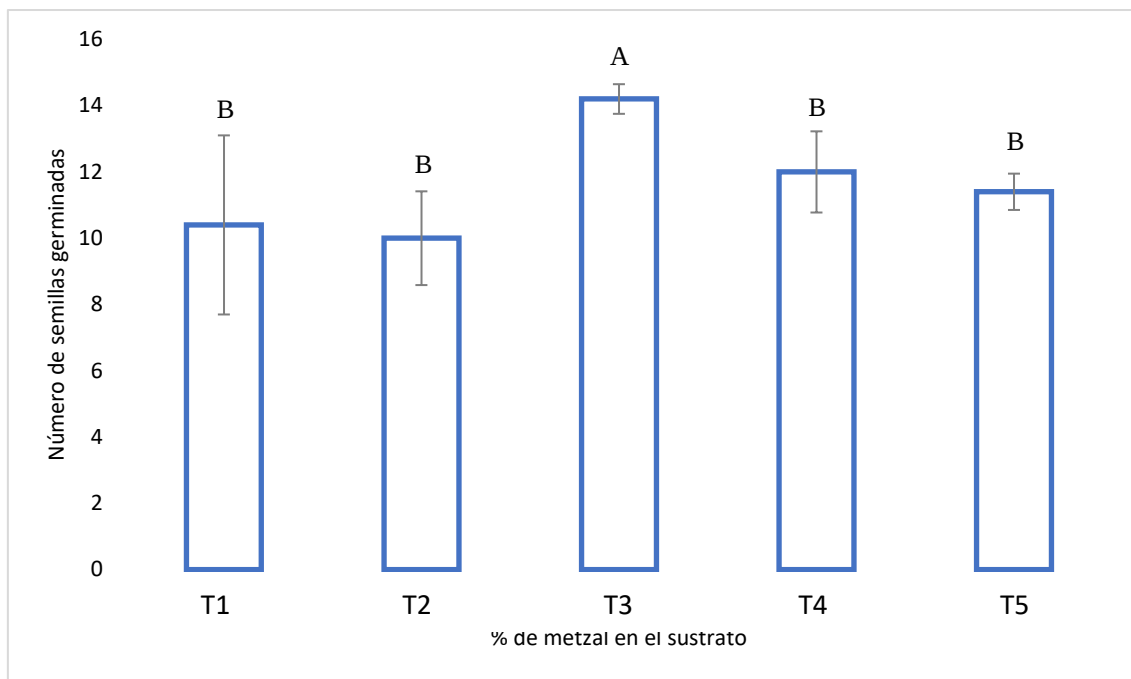
Gráfica 3. Peso fresco de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en función del porcentaje de metzal en el sustrato por tratamiento. **Nota:** Las barras representan el promedio $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0.05$).



Gráfica 4. Número de espigas de cebada (*Hordeum vulgare* L.) por tratamiento con diferentes proporciones de metzal en el sustrato por tratamiento. **Nota:** Las barras representan el promedio $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).



Gráfica 5. Altura de planta de cebada en función del porcentaje de metzal en el sustrato a los 78 días de cultivo por tratamiento. **Nota:** Las barras representan el promedio $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$).



Gráfica 6. Número de semillas germinadas de cebada a los 78 días en diferentes porcentajes de metzal en el sustrato. **Nota.** Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre los tratamientos, de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Los tratamientos con menor proporción de metzal (T1, 0 %; T2, 5 %) y aquellos con concentraciones superiores (T4, 20 %; T5, 30 %) mostraron valores estadísticamente inferiores o similares entre sí para estas variables, lo que evidencia una respuesta no lineal del cultivo al incremento del residuo en el sustrato. Este comportamiento indica la existencia de una proporción intermedia (10%) en la que el metzal favorece el desarrollo vegetativo y reproductivo sin generar condiciones físicas desfavorables en el medio de crecimiento.

En contraste, las variables químicas del sustrato (pH, conductividad eléctrica, NO_3^- , Ca^{2+} , K^+ y Na^+) no presentaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), (ANOVA, prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$), como se observa en la Tabla 6, lo que indica que el metzal no actuó como fuente nutrimental directa. Este resultado respalda la interpretación de que los efectos observados en el crecimiento de la cebada se relacionan principalmente con modificaciones en las propiedades físicas del sustrato, tales como la aireación, la retención de humedad y la estructura, más que con cambios en su composición química, como ha sido reportado previamente para el uso de enmiendas orgánicas en cereales (Martínez-Gutiérrez et al., 2005; Rodríguez et al., 2018).

Tabla 6. Propiedades químicas del sustrato en el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en función del porcentaje de metzal incorporado

% de metzal en el sustrato					
Parámetro	0	5	10	20	30
pH	7.96 ± 0.08 ^A	7.68 ± 0.31 ^A	8.16 ± 0.05 ^A	7.82 ± 0.29 ^A	7.96 ± 0.53 ^A
CE (μS·cm ⁻¹)	1547.80 ± 232 ^A	1458.60 ± 92 ^A	1272.20 ± 172 ^A	1362.80 ± 121 ^A	1377.60 ± 200 ^A
NO ₃ ⁻ (ppm)	328.00 ± 99 ^A	284.00 ± 25 ^A	386.00 ± 46 ^A	198.00 ± 44 ^A	282.00 ± 56 ^A
Ca ²⁺ (ppm)	186.00 ± 60 ^A	164.00 ± 15 ^A	128.00 ± 14 ^A	150.00 ± 28 ^A	166.00 ± 38 ^A
K ⁺ (ppm)	34.40 ± 11 ^A	37.60 ± 4 ^A	54.00 ± 13 ^A	56.00 ± 5 ^A	85.80 ± 6 ^A
Na ⁺ (ppm)	158.00 ± 32 ^A	158.00 ± 13 ^A	174.00 ± 53 ^A	135.00 ± 11 ^A	106.80 ± 10 ^A

Nota: Los valores corresponden a la media ± desviación estándar. Letras iguales en la misma fila indican ausencia de diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA, prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$). El pH es adimensional; CE se expresa en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y los iones en ppm.

El ACP se utilizó como herramienta exploratoria para integrar simultáneamente las variables evaluadas y visualizar patrones de asociación entre tratamientos (Figura 8), (Jolliffe, 2002). En el plano factorial, las variables productivas (peso fresco, altura de planta y número de espigas) se asociaron principalmente con el tratamiento T3, mientras que las variables químicas del sustrato se distribuyeron de manera más homogénea entre los tratamientos, sin mostrar una asociación clara con incrementos específicos del residuo.

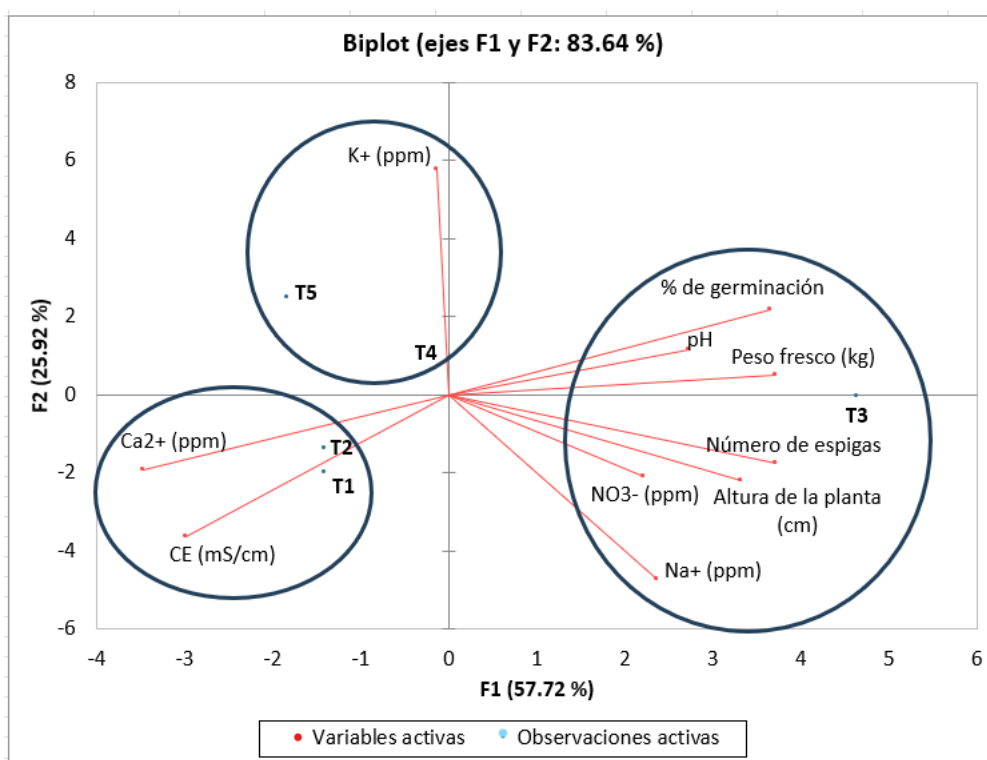


Figura 8. Biplot del ACP de las variables evaluadas en cebada (*Hordeum vulgare* L.) bajo diferentes proporciones de metzal.

Nota: El biplot del ACP muestra la relación entre los tratamientos (T1–T5) y las variables productivas y químicas evaluadas en cebada (*Hordeum vulgare* L.). Los dos primeros componentes (F1 y F2) explicaron conjuntamente el 83.64 % de la variación total de los datos. La proximidad entre tratamientos y variables indica mayor asociación, mientras que la separación en el plano factorial refleja diferencias en el comportamiento de las variables. Las variables productivas (peso fresco, altura de planta y número de espigas) se agrupan en el mismo cuadrante y se asocian con el tratamiento T3, mientras que las variables químicas del sustrato (pH, conductividad eléctrica, NO_3^- , Ca^{2+} , K^+ y Na^+) se distribuyen de manera más homogénea entre los tratamientos.

En conjunto, los resultados indican que el metzal puede incorporarse en proporciones moderadas (10%) para favorecer variables clave del rendimiento en cebada, mientras que incrementos mayores en su proporción (20% Y 30%) no necesariamente se traducen en un mejor desempeño agronómico. Este comportamiento concuerda con lo reportado para sistemas agrícolas que emplean residuos orgánicos de bajo aporte nutrimental, donde el efecto principal se asocia a la mejora de las propiedades físicas del sustrato más que a un enriquecimiento químico (Rodríguez et al., 2018; Dai et al., 2023).

Determinación de la eficiencia biológica (EB) y la tasa de producción (TP) de *Pleurotus* sp.

La EB y la TP de *Pleurotus* sp. cultivadas en sustratos con diferentes proporciones de rastrojo y metzal mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). El tratamiento con 100 % rastrojo presentó los valores más altos de EB (34.07 %) y TP ($6.4 \text{ g} \cdot \text{día}^{-1}$), mientras que el tratamiento con 100 % metzal registró los valores más bajos para ambos parámetros productivos (Gráficas 7 y 8).

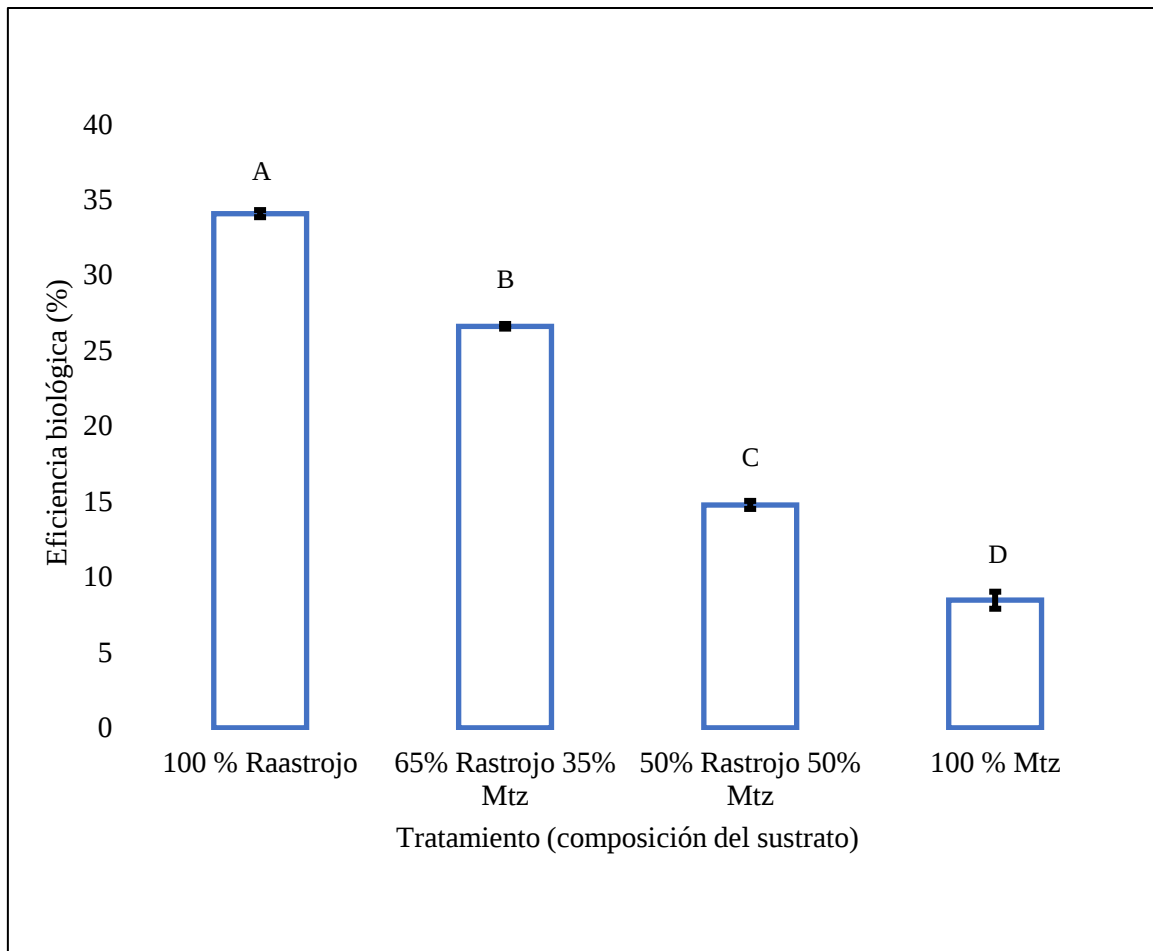
La disminución de la EB y la TP conforme aumentó la proporción de metzal en el sustrato, indica que este material ofrece condiciones menos favorables para la producción de cuerpos fructíferos. Este comportamiento concuerda con estudios recientes que señalan que los sustratos agrícolas convencionales, como las pajas de cereales, presentan una mayor eficiencia productiva debido a una mejor disponibilidad de nutrientes y a una estructura física más adecuada para el desarrollo de *Pleurotus* spp. (Royse & Sánchez, 2017; Bonilla-Toscano, 2024; Dai et al., 2023).

El bajo desempeño del metzal como sustrato único puede atribuirse a su composición predominantemente lignocelulósica y a su bajo contenido de nitrógeno, factores que limitan la velocidad de colonización micelial y la formación de cuerpos fructíferos, particularmente en cepas silvestres (España-Rodríguez et al., 2021). Investigaciones recientes han documentado que residuos derivados de agave pueden utilizarse para el cultivo de *Pleurotus*, aunque generalmente presentan eficiencias

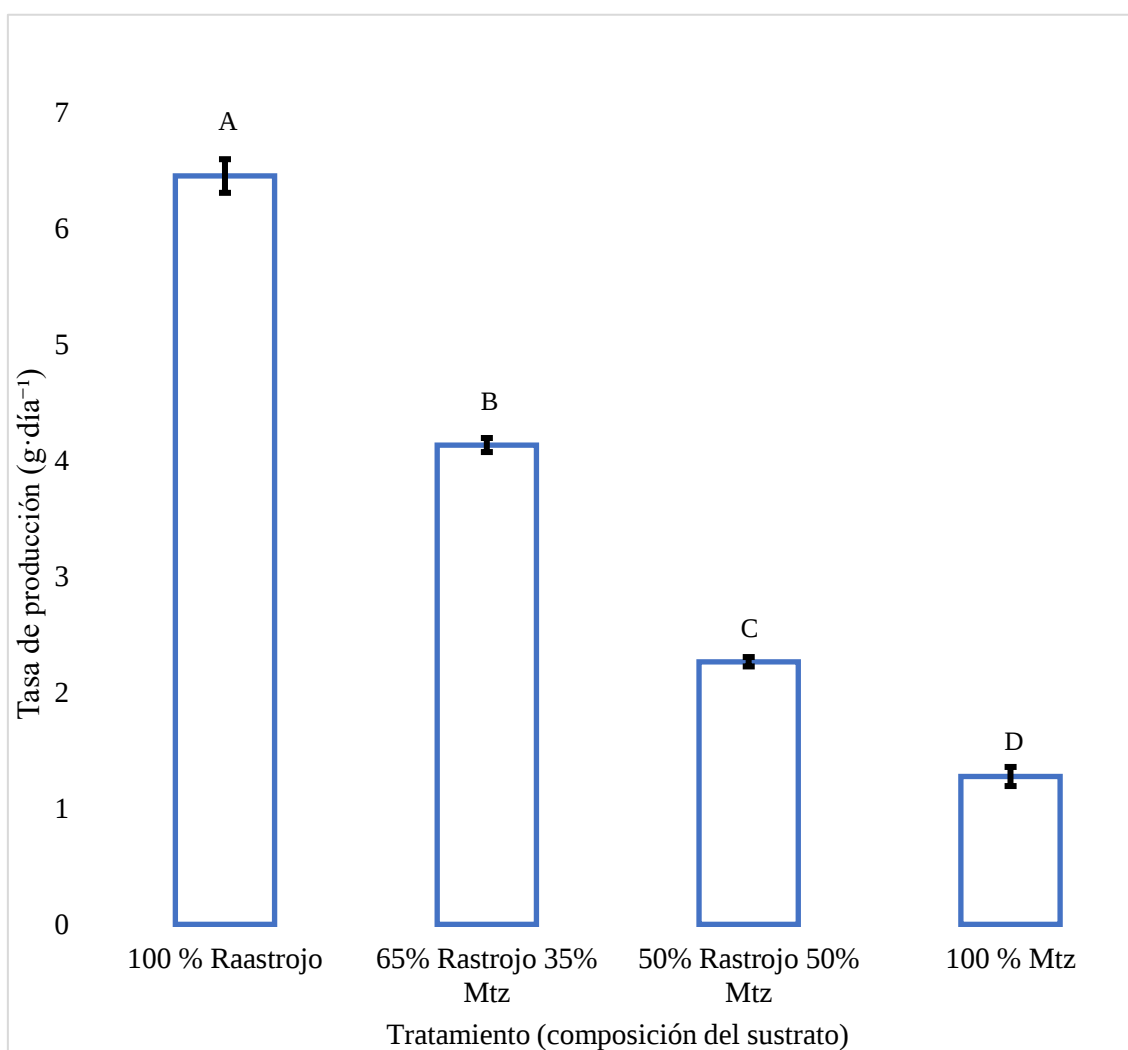
biológicas variables e inferiores a las obtenidas con sustratos tradicionales, especialmente cuando no se combinan con materiales más nutritivos (Portilla-Segura et al., 2019; Dai et al., 2023).

A pesar de estas limitaciones, en todos los tratamientos evaluados se logró la formación de cuerpos fructíferos, lo cual permitió cuantificar los parámetros productivos del hongo. Este aspecto es relevante considerando que diversas investigaciones han reportado que no todas las cepas de *Pleurotus* asociadas a *Agave* spp. logran fructificar bajo condiciones controladas, debido a su alta variabilidad genética y fisiológica (Ramírez-Carrasco et al., 2010; Barrales & Mata, 2016). La fructificación observada en este estudio confirma el potencial productivo de la cepa utilizada y permite su evaluación experimental en sustratos alternativos.

En conjunto, los resultados indican que el metzal de *Agave salmiana* no superó al rastrojo como sustrato productivo cuando se emplea de forma exclusiva; sin embargo, permitió la fructificación del hongo y la evaluación de su desempeño productivo, aportando información relevante sobre el comportamiento de cepas silvestres de *Pleurotus* asociadas a *Agave* bajo condiciones controladas.



Gráfica 7. Eficiencia biológica de *Pleurotus* sp. cultivado en sustratos con diferentes proporciones de rastrojo y metzal. **Nota:** Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0.05$).



Gráfica 8. Tasa de producción de *Pleurotus* sp. cultivado en sustratos con diferentes proporciones de rastrojo y metzal. **Nota:** Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 5$). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (prueba de Tukey, $\alpha = 0.05$).

Análisis sensorial CATA

Apariencia visual (color)

En la evaluación de la apariencia visual, los resultados del análisis CATA evidenciaron diferencias claras entre *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp., mientras que las muestras de *Pleurotus* sp. cultivadas en metzal y en paja mostraron un comportamiento visual similar. El ACM permitió visualizar estas asociaciones de manera integrada (Figura 9).

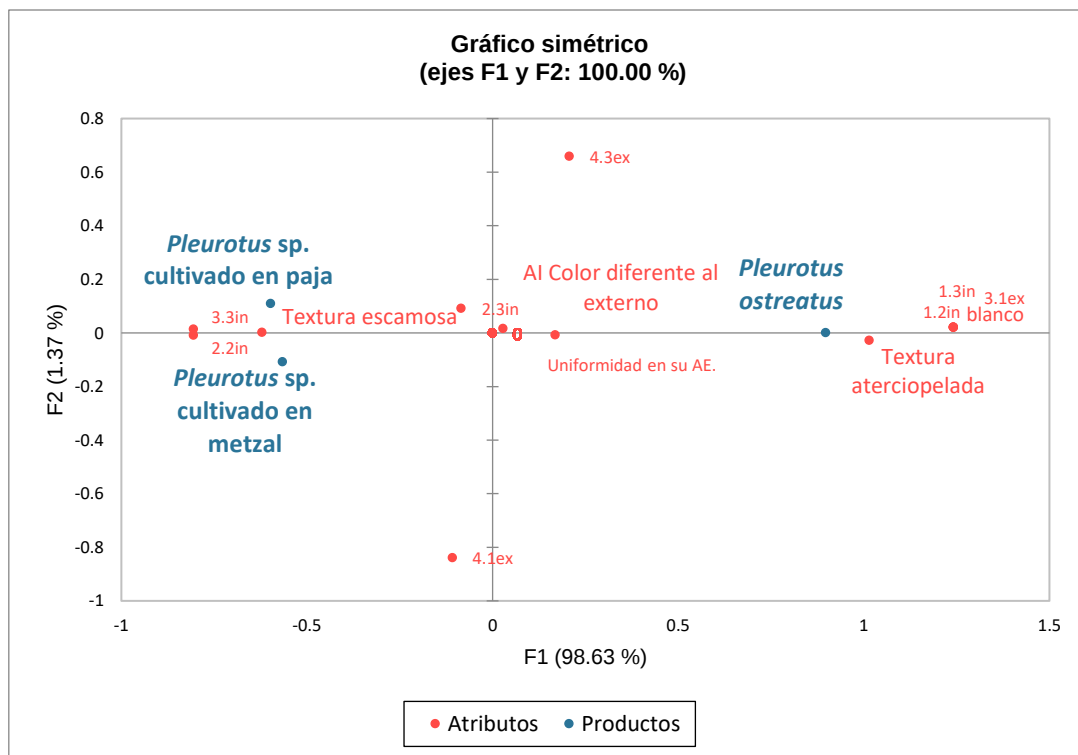


Figura 9. ACM para los descriptores de apariencia visual y color de *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja

Nota: El gráfico simétrico del ACM muestra la asociación entre las muestras y los descriptores visuales obtenidos mediante la metodología CATA. Los ejes F1 y F2 explican el 100 % de la variabilidad total. La proximidad entre productos y atributos indica una mayor asociación perceptual, mientras que los descriptores cercanos al origen corresponden a atributos compartidos.

En el plano factorial, las muestras de *Pleurotus* sp. cultivadas en metzal y en paja se agruparon de forma cercana, asociándose principalmente con el descriptor textura escamosa y con tonalidades cromáticas intermedias identificadas mediante el círculo colorimétrico (códigos 3.3 y 2.2), en el carpóforo (Figura 10). Estos descriptores presentaron diferencias significativas ($p < 0.0001$) respecto a la muestra comercial de *P. ostreatus*, de acuerdo con la prueba Q de Cochran y las comparaciones múltiples por pares mediante el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin (Tabla 7).

Tabla 7. Prueba Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares (procedimiento de diferencia crítica de Sheskin) para los descriptores visuales con diferencias significativas evaluados mediante la metodología CATA en *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. (cultivado en metzal y paja)

Descriptor visual / color	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Pleurotus</i> sp. (metzal)	<i>Pleurotus</i> sp. (paja)
Textura escamosa	0.18 ^a	0.92 ^b	0.90 ^b
Textura aterciopelada	0.96 ^b	0.08 ^a	0.04 ^a
Uniformidad color externo	0.98 ^b	0.56 ^a	0.52 ^a

Descriptor visual / color	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Pleurotus</i> sp. (metzal)	<i>Pleurotus</i> sp. (paja)
Uniformidad color interno	0.22 ^a	0.16 ^a	0.16 ^a
Blanco (círculo cromático)	0.42 ^b	0.00 ^a	0.00 ^a
Código 1.2	0.06 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a
Código 1.3	0.40 ^b	0.00 ^a	0.00 ^a
Código 2.2	0.00 ^a	0.32 ^b	0.32 ^b
Código 2.3	0.12 ^a	0.10 ^a	0.12 ^a
Código 3.3	0.00 ^a	0.58 ^b	0.56 ^b
Código 3.1 (externo)	0.12 ^b	0.00 ^a	0.00 ^a
Código 4.1 (externo)	0.02 ^a	0.04 ^a	0.00 ^a
Código 4.3 (externo)	0.02 ^a	0.00 ^a	0.02 ^a

Nota.

La tabla incluye únicamente los descriptores visuales que presentaron diferencias significativas ($p < 0.0001$) según la prueba Q de Cochran. Valores seguidos por la misma letra dentro de cada fila no difieren significativamente, de acuerdo con el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin. Los códigos cromáticos corresponden a las tonalidades identificadas mediante el círculo colorimétrico utilizado durante la evaluación sensorial.

En contraste, *Pleurotus ostreatus* se posicionó de manera diferenciada en el espacio factorial, asociado a los descriptores: textura aterciopelada, uniformidad de color externo, blanco y a los códigos cromáticos 1.3 (interno) y 3.1 (externo) del círculo colorimétrico (Figura 10), estos descriptores presentaron diferencias significativas respecto a *Pleurotus* sp. ($p < 0.0001$). de acuerdo con la prueba Q de Cochran y las comparaciones múltiples por pares mediante el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin (Tabla 7). Estas asociaciones reflejan una apariencia más homogénea y estandarizada, característica de setas comerciales producidas bajo sistemas controlados, donde la uniformidad visual constituye un criterio de calidad relevante (Valverde et al., 2015; Ares et al., 2019).



Figura 10. Círculo colorimétrico empleado para la evaluación del color en hongos comestibles (Lawless & Heymann, 2010; Meilgaard et al., 2016).

Nota. El círculo colorimétrico se utilizó como apoyo visual para identificar los colores externo e interno de las muestras durante la prueba sensorial. Los jueces seleccionaron las tonalidades que mejor representaron cada muestra, las cuales fueron registradas mediante códigos numéricos y posteriormente empleadas en el análisis estadístico.

La cercanía entre *Pleurotus* sp. cultivado en paja y en metzal indica que el tipo de sustrato no influyó en la percepción del color, lo cual sugiere que las variaciones cromáticas observadas responden principalmente a características intrínsecas de la cepa, asociadas a su expresión fenotípica, más que al sustrato empleado durante el cultivo. Este comportamiento ha sido reportado previamente en estudios, donde se ha observado que rasgos como la coloración, el tamaño y la morfología pueden mantenerse relativamente constantes dentro de una misma cepa, aun cuando se modifiquen ciertas condiciones del sistema de producción (Gaitán-Hernández et al. 2014; López-Martínez et al., 2025).

El uso del círculo colorimétrico permitió una descripción más precisa y reproducible de las tonalidades percibidas por los jueces, lo que facilitó la interpretación del atributo color en matrices biológicas heterogéneas, como los cuerpos fructíferos de hongos comestibles (Lawless & Heymann, 2010; Meilgaard et al., 2016).

En conjunto, los resultados evidencian que la apariencia visual y el color permiten diferenciar claramente a *Pleurotus ostreatus* del hongo de maguey, mientras que entre los hongos cultivados en metzal y paja las diferencias fueron mínimas, reforzando la estabilidad fenotípica del hongo de maguey independientemente del sustrato evaluado.

Sabor

De acuerdo con la prueba Q de Cochran y las comparaciones múltiples por pares mediante el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin, se identificaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en algunos descriptores de sabor entre las muestras evaluadas (Tabla 8). En particular, los descriptores ligero y mariscos presentaron diferencias significativas entre *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp., mientras que no se observaron diferencias significativas entre *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada para estos atributos.

En contraste, descriptores como fuerte, amargo, dulce, salado, umami, astringencia, metálico, almendras, picante, berros y pollo no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las tres muestras evaluadas ($p > 0.05$), por lo que se consideran atributos compartidos dentro del perfil sensorial de sabor.

Descriptores como acre, anís y nueces presentaron frecuencias de selección nulas o cercanas a cero en las tres muestras evaluadas, lo que indica que estos atributos no fueron percibidos por los jueces y, por tanto, no influyeron en la diferenciación sensorial del perfil de sabor.

Tabla 8. Prueba Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares (procedimiento de diferencia crítica de Sheskin) para los descriptores de sabor evaluados mediante la metodología CATA en *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada

Atributo	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Pleurotus</i> sp. (metzal)	<i>Pleurotus</i> sp. (paja)
Mariscos	0.96 ^b	0.74 ^a	0.72 ^a
Fuerte	0.72 ^a	0.88 ^a	0.80 ^a
Ligero	0.76 ^b	0.06 ^a	0.14 ^a
Dulce	0.14 ^a	0.40 ^b	0.42 ^b
Salado	0.56 ^a	0.54 ^a	0.48 ^a
Metálico	0.42 ^a	0.62 ^a	0.62 ^a
Picante	0.40 ^a	0.36 ^a	0.32 ^a
Amargo	0.24 ^a	0.30 ^a	0.22 ^a
Astringencia	0.10 ^a	0.06 ^a	0.04 ^a
Pollo	0.10 ^a	0.02 ^a	0.04 ^a
Almendras	0.02 ^a	0.12 ^a	0.10 ^a
Umami	0.02 ^a	0.04 ^a	0.04 ^a
Insípido	0.04 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a
Zanahoria cocida	0.00 ^a	0.14 ^b	0.08 ^{ab}
Berros	0.10 ^a	0.10 ^a	0.06 ^a
Acre	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a
Anís	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a
Nueces	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a

Nota: Los valores corresponden a la proporción de jueces que seleccionaron cada descriptor en la prueba CATA. Valores seguidos por la misma letra dentro de cada fila no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$), de acuerdo con el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin. La significancia global por descriptor se determinó mediante la prueba Q de Cochran ($p < 0.05$).

El ACM permitió visualizar las asociaciones entre las muestras y los descriptores de sabor identificados (Figura 11). En el plano factorial, *Pleurotus ostreatus* se asoció principalmente con los descriptores ligero y mariscos, los cuales coincidieron con los que mostraron diferencias significativas en el análisis estadístico univariado.

Por su parte, *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada se ubicó de manera cercana en el espacio factorial y se asoció principalmente con los descriptores dulce, umami, metálico, amargo y zanahoria cocida. Estas asociaciones muestran patrones de proximidad sensorial dentro del espacio factorial, los cuales sugieren una orientación del perfil de sabor, aunque sin evidencia estadística suficiente para establecer diferencias sensoriales atribuibles al sustrato (Tabla 8).

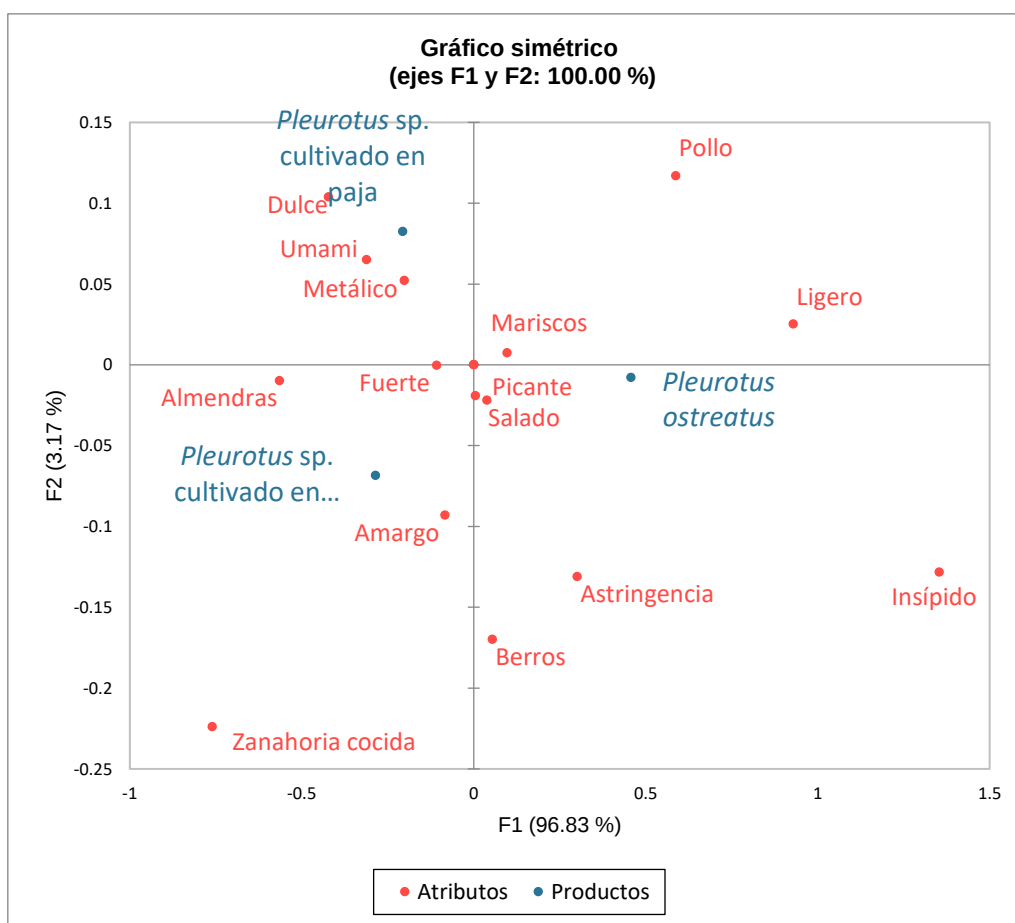


Figura 11. ACM para los descriptores de sabor de *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada, evaluados mediante la metodología CATA

Nota. El gráfico simétrico del ACM muestra la asociación entre las muestras de *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. (cultivado en paja y en metzal) y los descriptores de sabor obtenidos mediante la metodología CATA. Los ejes F1 y F2 explican el 100.00 % de la variabilidad total (F1 = 96.83 %; F2 = 3.17 %). La proximidad entre productos y atributos indica una mayor asociación sensorial, mientras que los descriptores cercanos al origen corresponden a atributos compartidos.

En conjunto, los resultados muestran que las diferencias sensoriales de sabor se concentran principalmente entre especies, mientras que el tipo de sustrato empleado para el cultivo de *Pleurotus* sp. no generó modificaciones perceptibles en el perfil gustativo bajo las condiciones evaluadas. Este comportamiento ha sido reportado previamente en estudios sensoriales de hongos comestibles, donde el sustrato influye de manera limitada en el sabor final, manteniéndose este mayormente determinado por características propias de la especie (Stone & Sidel, 2004; Varela & Ares, 2012; Dai et al., 2023).

Textura en boca

De acuerdo con la prueba Q de Cochran y las comparaciones múltiples por pares mediante el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin, se identificaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en algunos descriptores de textura en boca entre las muestras evaluadas (Tabla 9). En particular, los descriptores suave, duro, fibroso, carnoso y gelatinoso mostraron diferencias entre *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp., mientras que no se detectaron diferencias significativas entre *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada para estos atributos.

En el caso del descriptor suave, *Pleurotus ostreatus* presentó una mayor frecuencia de selección en comparación con *Pleurotus* sp. cultivado tanto en metzal como en paja, lo que indica una percepción de textura más blanda y homogénea en la seta comercial. De manera opuesta, los descriptores duro y fibroso se asociaron principalmente con *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja, sin diferencias significativas entre ambos sustratos, lo que sugiere un comportamiento textural similar del hongo de maguey independientemente del residuo utilizado.

El descriptor carnoso mostró una tendencia intermedia, con mayor frecuencia en *Pleurotus* sp. cultivado en paja, aunque sin diferenciarse claramente del cultivado en metzal. Por su parte, el atributo gelatinoso se asoció principalmente con *Pleurotus ostreatus*, lo que lo diferencia de las muestras de hongo de maguey. Los descriptores crujiente y polvoriento presentaron frecuencias de selección bajas y no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras, por lo que no contribuyeron de manera relevante a la discriminación textural.

Tabla 9. Prueba Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares (procedimiento de diferencia crítica de Sheskin) para los descriptores de textura en boca evaluados mediante la metodología CATA en *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada

Atributo	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Pleurotus</i> sp. (metzal)	<i>Pleurotus</i> sp. (paja)
Crujiente	0.00 ^a	0.08 ^a	0.12 ^a
Suave	0.80 ^b	0.02 ^a	0.04 ^a
Duro	0.18 ^a	0.72 ^b	0.70 ^b
Fibroso	0.10 ^a	0.90 ^b	0.86 ^b
Polvoriento	0.00 ^a	0.00 ^a	0.02 ^a
Carnoso	0.02 ^a	0.12 ^{ab}	0.18 ^b
Gelatinoso	0.08 ^b	0.00 ^a	0.00 ^a

Nota. Los valores corresponden a la proporción de jueces que seleccionaron cada descriptor en la prueba CATA. Valores seguidos por la misma letra dentro de cada fila no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$), de acuerdo con el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin. La significancia global por descriptor se determinó mediante la prueba Q de Cochran ($p < 0.05$).

Por otro lado, el ACM permitió visualizar de manera integrada las asociaciones entre las muestras y los descriptores de textura en boca (Figura 12). En el plano factorial, *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada se ubicaron próximos entre sí y se asociaron principalmente con los descriptores duro, fibroso, carnososo y crujiente, lo que refleja una textura más firme y estructurada del hongo de maguey. En contraste, *Pleurotus ostreatus* se posicionó de forma diferenciada y se asoció con los descriptores suave y gelatinoso, consistentes con una percepción de textura más blanda y uniforme.

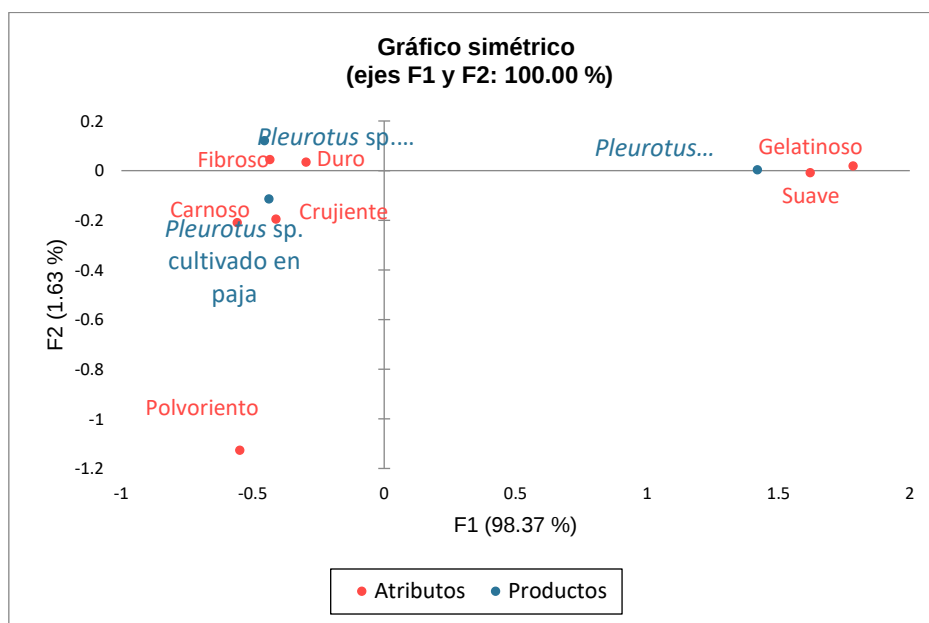


Figura 12. ACM para los descriptores de textura en boca de *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada, evaluados mediante la metodología CATA.

Nota. El gráfico simétrico del ACM muestra la asociación entre las muestras y los descriptores de textura en boca. Los ejes F1 y F2 explican el 100.00 % de la variabilidad total (F1 = 98.37 %; F2 = 1.63 %). La proximidad entre productos y atributos indica mayor asociación sensorial, mientras que los descriptores cercanos al origen corresponden a atributos compartidos.

En conjunto, los resultados indican que las diferencias sensoriales en la textura en boca se concentran principalmente entre especies, mientras que el tipo de sustrato empleado para el cultivo de *Pleurotus* sp. no generó modificaciones perceptibles en el perfil textural bajo las condiciones evaluadas. Este comportamiento es consistente con lo reportado para hongos comestibles, donde la textura se relaciona principalmente con características estructurales propias del carpóforo y no necesariamente con el sustrato de cultivo (Lawless & Heymann, 2010; Meilgaard et al., 2016; Cardoso et al., 2019).

Aroma

De acuerdo con la prueba Q de Cochran y las comparaciones múltiples por pares mediante el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin, se identificaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en algunos descriptores aromáticos entre las muestras evaluadas (Tabla 10). En particular, los descriptores: amaderado, seta fresca y terroso presentaron diferencias significativas entre *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp., mientras que no se observaron diferencias significativas entre *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada para estos atributos.

Asimismo, los descriptores: metálico, descomposición y rancio mostraron diferencias significativas asociadas principalmente a *Pleurotus ostreatus*, el cual presentó mayores frecuencias de selección en comparación con las muestras de *Pleurotus* sp., en las que dichos atributos estuvieron ausentes o con valores cercanos a cero (Tabla 10).

En contraste, los descriptores: ahumado, mantecoso, dulce, hierba, cítrico, frutal, malta, floral, harina húmeda, albaricoque y miel no mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las tres muestras evaluadas ($p > 0.05$), por lo que se consideran atributos compartidos en el perfil aromático. Los descriptores nueces, acre y almendra presentaron frecuencias de selección nulas o cercanas a cero en todas las muestras, lo que indica que estos atributos no fueron percibidos por los jueces y, por tanto, no contribuyeron a la diferenciación aromática (Tabla 10).

Tabla 10. Prueba Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares (procedimiento de diferencia crítica de Sheskin) para los descriptores de aroma evaluados mediante la metodología CATA en *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada

Atributo	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Pleurotus</i> sp. (metzal)	<i>Pleurotus</i> sp. (paja)
Ahumado	0.04 ^a	0.20 ^a	0.14 ^a
Mantecoso	0.10 ^a	0.04 ^a	0.02 ^a
Amaderado	0.22 ^a	0.94 ^b	0.96 ^b
Seta fresca	0.64 ^a	0.98 ^b	1.00 ^b
Dulce	0.42 ^a	0.46 ^a	0.40 ^a
Metálico	0.12 ^b	0.00 ^a	0.00 ^a
Hierba	0.72 ^a	0.80 ^a	0.74 ^a
Cítrico	0.44 ^b	0.34 ^{ab}	0.22 ^a
Frutal	0.82 ^a	0.68 ^a	0.64 ^a
Malta	0.32 ^a	0.32 ^a	0.22 ^a
Floral	0.52 ^a	0.50 ^a	0.48 ^a
Harina húmeda	0.08 ^a	0.10 ^a	0.12 ^a
Descomposición	0.12 ^b	0.00 ^a	0.00 ^a
Miel	0.00 ^a	0.04 ^a	0.08 ^a
Albaricoque	0.00 ^a	0.02 ^a	0.02 ^a
Terroso	0.44 ^a	0.96 ^b	0.92 ^b
Rancio	0.14 ^b	0.02 ^a	0.04 ^a
Acre	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a
Anís	0.04 ^a	0.02 ^a	0.00 ^a
Almendra	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a
Nueces	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a

Nota. Los valores corresponden a la proporción de jueces que seleccionaron cada descriptor aromático en la prueba CATA. Valores seguidos por la misma letra dentro de cada fila no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$), de acuerdo con el procedimiento de diferencia crítica de Sheskin. La significancia global por descriptor se determinó mediante la prueba Q de Cochran ($p < 0.05$).

El ACM permitió visualizar las asociaciones entre las muestras y los descriptores aromáticos identificados (Figura 13). En el plano factorial, *Pleurotus ostreatus* se asoció principalmente con los descriptores metálicos, descomposición y rancio, los cuales coincidieron con aquellos que mostraron diferencias significativas en el análisis estadístico univariado.

Por su parte, *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada se ubicó de manera cercana en el espacio factorial y se asoció principalmente con los descriptores seta fresca, amaderado, terroso, hierba, dulce y malta. Estas asociaciones describen tendencias aromáticas compartidas entre ambos sustratos y no corresponden a diferencias estadísticamente significativas entre ellos, lo que indica una alta similitud en el perfil aromático del hongo de maguey independientemente del material de cultivo (Figura 13).

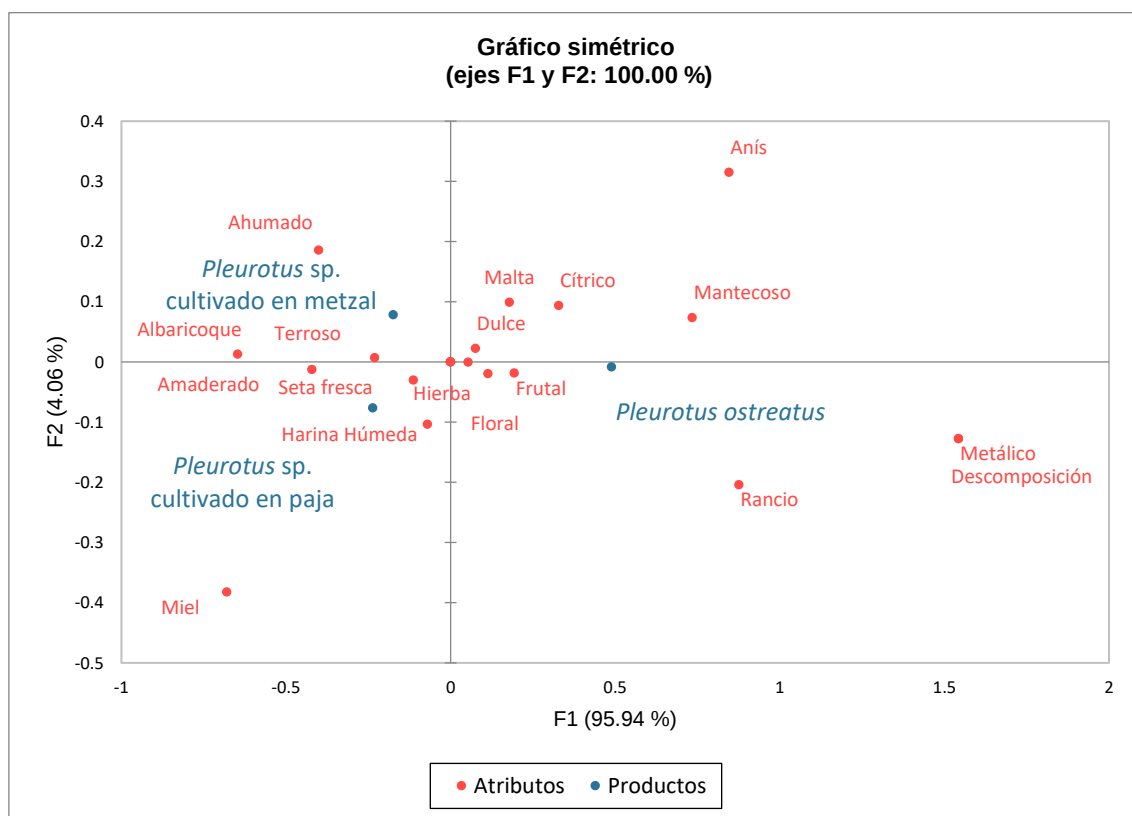


Figura 13. ACM para los descriptores de aroma de *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja de cebada, evaluados mediante la metodología CATA.

Nota. El gráfico simétrico del ACM muestra la asociación entre las muestras y los descriptores aromáticos obtenidos mediante la metodología CATA. Los ejes F1 y F2 explican el 100.00 % de la variabilidad total (F1 = 95.94 %; F2 = 4.06 %). La proximidad entre productos y atributos indica una mayor asociación aromática, mientras que los descriptores cercanos al origen corresponden a atributos compartidos.

En conjunto, los resultados indican que las diferencias aromáticas se concentran principalmente entre especies, mientras que el tipo de sustrato empleado para el cultivo de *Pleurotus* sp. no generó modificaciones perceptibles en el perfil aromático bajo las condiciones evaluadas. Este comportamiento concuerda con lo reportado en estudios sensoriales de hongos comestibles, en los que el aroma está determinado principalmente

por características propias de la especie y no por el material lignocelulósico utilizado como sustrato (Stone & Sidel, 2004; Varela & Ares, 2012; Dai et al., 2023).

Integración sensorial: color, aroma, sabor y textura en boca

El análisis integrado de los atributos sensoriales de color, aroma, sabor y textura en boca permitió una caracterización más completa del perfil sensorial del hongo de maguey (*Pleurotus* sp.), y su comparación con la muestra comercial de *Pleurotus ostreatus*. En conjunto, los resultados de las pruebas estadísticas (Q de Cochran y comparaciones múltiples por pares) y los análisis multivariados (ACM) mostraron patrones consistentes entre atributos y muestras, lo que facilitó una interpretación global del comportamiento sensorial.

En cuanto al color y la apariencia visual, se observaron diferencias claras entre el hongo de maguey y la seta comercial. Las muestras de *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja compartieron descriptores visuales similares, sin diferencias significativas entre ellas ($p > 0.05$) (Tabla 7), particularmente en atributos relacionados con textura escamosa y variaciones de tonalidad interna y externa. En contraste, *Pleurotus ostreatus* se asoció con descriptores de mayor uniformidad cromática y de una textura visual más aterciopelada, lo cual fue confirmado tanto por la prueba Q de Cochran como por su posicionamiento diferenciado en el ACM. Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios sensoriales donde los hongos comerciales presentan apariencias más homogéneas debido a procesos de selección y estandarización (Cardoso et al., 2019; López-Martínez et al., 2025).

Para los atributos de aroma, los resultados indicaron que las muestras de hongo de maguey producidas en distintos sustratos no presentaron diferencias significativas entre sí ($p > 0.05$), lo que sugiere que el tipo de residuo utilizado no modificó perceptiblemente el perfil aromático. Sin embargo, sí se detectaron diferencias significativas entre el *Pleurotus* sp. y la muestra comercial (Tabla 10), la cual se caracterizó por aromas más suaves y homogéneos. Este patrón ha sido descrito previamente en evaluaciones sensoriales comparativas entre hongos silvestres y cultivados comercialmente, en las que los perfiles aromáticos de los primeros suelen ser más intensos y distintivos (Lawless & Heymann, 2010; Dai et al., 2023).

En cuanto al sabor, se observó un comportamiento similar al del aroma. Las muestras de *Pleurotus* sp. cultivado en metzal y en paja se agruparon sensorialmente, sin diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), mientras que *Pleurotus ostreatus* se diferenció por atributos asociados a un perfil gustativo más neutro (Tabla 8). Estos resultados sugieren que el sabor del hongo de maguey responde principalmente a características propias de la especie y no al tipo de sustrato, lo cual concuerda con estudios que destacan la estabilidad del perfil gustativo en hongos silvestres independientemente del sistema de producción (Meilgaard et al., 2016; López-Martínez et al., 2025).

Respecto a la textura en boca, las muestras de hongo de maguey presentaron percepciones similares entre los sustratos, sin diferencias significativas en la mayoría de los descriptores evaluados ($p > 0.05$) (Tabla 9). Los atributos asociados a la firmeza y al comportamiento de la textura durante la masticación se diferenciaron claramente de los observados en la seta comercial, la cual se percibió como más suave y homogénea. Este comportamiento se reflejó de manera consistente en los ACM, lo que confirma que la textura es una característica sensorial propia de la especie más que una respuesta al sustrato de cultivo (Cardoso et al., 2019; Lawless & Heymann, 2010).

Los Análisis de Correspondencias Múltiples reforzaron estas observaciones al mostrar una agrupación consistente de las muestras de *Pleurotus* sp. producido en metzal y en paja, las cuales se correlacionaron con descriptores sensoriales similares en las cuatro categorías evaluadas, mientras que *Pleurotus ostreatus* se posicionó de manera separada. Este patrón indica que, aunque el metzal forma parte del sistema maguey, su uso como sustrato no generó modificaciones sensoriales perceptibles en color, aroma, sabor o textura en boca, lo cual puede explicarse por el origen del residuo y su limitada influencia directa sobre los compuestos responsables de estas percepciones.

En conjunto, la integración de los atributos sensoriales evaluados permite describir al hongo de maguey como una especie con un perfil sensorial propio y consistente, independiente del sustrato utilizado, y claramente diferenciado de la seta comercial. La aplicación combinada de CATA, pruebas no paramétricas y ACM resultó adecuada para describir estas relaciones sensoriales de forma integral, sin establecer inferencias causales directas y manteniendo el carácter descriptivo del estudio

conclusión

El residuo metzal de *Agave salmiana* puede revalorizarse como un componente funcional en sistemas agrícolas y biotecnológicos, aportando beneficios asociados principalmente a la mejora de las propiedades físicas de los sustratos. Su aplicación mostró resultados viables en la producción de hongos comestibles y en cultivos agrícolas, además de generar información novedosa sobre el hongo de maguey. En conjunto, el estudio muestra que el metzal es un residuo agroindustrial con potencial de uso diferenciado, cuyas aplicaciones y limitaciones quedan claramente definidas.

Referencias

- Abad, M., Noguera, P., & Bures, S. (2002). National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: Case study in Spain. *Bioresource Technology*, 77(2), 197–200. Inventario nacional de residuos orgánicos para su uso como sustrato de cultivo para la producción de plantas ornamentales en maceta: estudio de caso en España - PubMed
- Aguilar-Pumahuillca, F., Huamán-Huamán, H., & Holgado-Rojas, M. (2019). Caracterización de *Pleurotus* sp. aislado de la comunidad nativa de Korimani, Cusco, Perú. *Ecología Aplicada*, 18(1), 45–50. CARACTERIZACIÓN DE *Pleurotus* sp. DE LA COMUNIDAD NATIVA KORIMANI, CUSCO, PERÚ
- Aguirre-Acosta, Elvira, Ulloa, Miguel, Aguilar, Samuel, Cifuentes, Joaquín, & Valenzuela, Ricardo. (2014). Biodiversidad de hongos en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(Supl. ene), S76-S81. <https://doi.org/10.7550/rmb.33649>
- Alonso-Gutiérrez, M. S., Ramírez-Cortina, C. R., & Rigal, L. (2012). Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18, 449–457. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.08.059>
- Álvarez-Ríos, G. D., Figueredo-Urbina, C. J., & Casas, A. (2020). Características físicas, químicas y microbiológicas del pulque: Manejo de una bebida fermentada en Michoacán, México. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 16, 3. <https://doi.org/10.1186/s13002-020-03539> https://www.researchgate.net/publication/338636426_Management_morphological_and_genetic_diversity_of_domesticated_agaves_in_Michoacan_Mexico
- AOAC. (2000) Official Method of the Acidity (Titratable) of Fruit Products. Method 942.15
- AOAC. (2000). Vitamin and other nutrient. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International. (17 ed). Gaithersburg, USA.

- AOAC. (2009). Official Method of the Association of Official Analytical Chemist International. Method 923.03.
- AOAC. (2010). Official Method of the Association of Official Analytical Chemist International. Method 920.39
- AOAC. (2010). Official Method of the Association of Official Analytical Chemist International. Method 962.09
- AOAC. (2012). Official Method of the Association of Official Analytical Chemist International. Method 925.09.
- AOAC. (2019). Official Method of the Association of Official Analytical Chemist International. Method 920.123.
- Ares, G., Antúnez, L., Bruzzone, F., Vidal, L., Giménez, A., Pineau, B., Hunter, D. C., & Jaeger, S. R. (2019). Comparison of several CATA variants for sensory product characterization. *Food Quality and Preference*, 71, 135–145. Comparación de caracterizaciones sensoriales estáticas y dinámicas de productos basadas en preguntas de comprobar todo lo que se aplica con los consumidores - ScienceDirect
<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.06.007>
- Aslam, M. (2023). Cochran's Q test for analyzing categorical data under uncertainty. *Journal of Big Data*, 10, 147. <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00823-3>
- BADUI DERGAL, SALVADOR Química de los alimentos. Cuarta edición PEARSON EDUCACIÓN, México, 2006 ISBN: 970-26-06 <https://fcen.uncuyo.edu.ar/upload/libro-badui200626571.pdf>
- Barrales, M., & Mata, G. (2016). Selección de cepas del hongo de maguey (*Pleurotus opuntiae*) y evaluación de su producción en sustratos fermentados. *Interciencia*, 41(5), 346–352. Redalyc. SELECCIÓN DE CEPAS NATIVAS DEL HONGO DE MAGUEY (*Pleurotus opuntiae*) Y EVALUACIÓN DE SU PRODUCCIÓN EN SUSTRATOS FERMENTADOS
- Bonilla-Toscano, L. R. (2024). Revisión sobre el aprovechamiento de residuos agroindustriales como sustrato en la producción de *Pleurotus* *Ostreatus* en México. *Xombätsi*, (7), 36–52. <https://revistas.uvp.mx/index.php/Xombatsi/article/view/346>
- BRAVO VARGAS Vocabulario Nahuatl Maguey Pulque - Gerardo Bravo Vargas : Gerardo Bravo Vargas : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive. (2014, 1 diciembre). Internet Archive.
<https://archive.org/details/GerardoBravoVargasVocabularioNahuatlMagueyPulque>
- Cabrera Durán, D. S., & Rosales Ortega, M. R. (2021). *Producción y comercialización del maguey pulquero (Agave salmiana) en Atltzayanca, Tlaxcala* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana].
<https://dcsh.izt.uam.mx/licenciatura/geografiahumana/wp-content/uploads/2022/02/SandraCabrera.pdf>
- Cano-Estrada, Araceli, & Romero-Bautista, Leticia. (2016). Valor económico, nutricional y medicinal de hongos comestibles silvestres. *Revista chilena de nutrición*, 43(1), 75-80. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000100011>

- Cardoso, R. V. C., Fernandes, Â., Barreira, J. C. M., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2019). Sensory analysis and chemical characterization of wild edible mushrooms. *Food Chemistry*, 292, 243–251. Propiedades químicas y bioactivas del arroz rojo con potencial de uso farmacéutico
- Chairez-Aquino, M. A., Moreno-García, B., Vázquez-Landaverde, P. A., & Robles-Martínez, F. (2015). Aprovechamiento de residuos agroindustriales lignocelulósicos como sustratos para la producción de hongos comestibles. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(2), 417–430.
<https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/1556>
- Crespo González, M. R., González Eguarte, D. R., Rodríguez Macías, R., Ruiz Corral, J. A., & Durán Puga, N. (2018). CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DEL BAGAJO DE AGAVE TEQUILERO COMPOSTADO CON BIOSÓLIDOS DE VINAZA COMO COMPONENTE DE SUSTRATOS PARA CULTIVOS EN CONTENEDOR. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 34(3), 373–382.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.01>
- Dai, Y., Li, L., & Zhang, Y. (2023). The input of microorganisms to the cultivation of mushrooms on lignocellulosic waste. *AIMS Agriculture and Food*, 8(1), 253–272.
<https://doi.org/10.3934/agrfood.2023014>
- Damiani, C., Amorim-Alves, K., & Dutcosky-Deboni, S. (2021). Check all that apply: A técnica amplamente utilizada em análise sensorial. En *Ciências agrárias: O avanço da ciência no Brasil* (Vol. 1, pp. 182-195). Editora Científica. <https://doi.org/10.37885/210404110>
- De Bonis, M., Pecchia, J. A., & Nicoletto, C. (2026). *Optimizing Pleurotus ostreatus cultivation: The role of light wavelengths and substrate composition on yield and nutritional value*. *Frontiers in Horticulture*, 4, Article 1720226.
<https://doi.org/10.3389/fhort.2025.1720226>
- De Vega-Luttmann, G., Arce-Cervantes, O., Méndez-Hernández, J. E., Espitia-López, J., & Hernández-León, S. (2021). *Evaluación de la actividad enzimática de Hericium erinaceus en residuos agroforestales* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Evaluación de la actividad enzimática de Hericium erinaceus en residuos agroforestales.
- Díaz, K., Casanova, M., León, C., Bardales, C., & Cabos, J. (2019). Producción de *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre diferentes residuos lignocelulósicos. *Arnaldoa*, 26(3), 1177–1184. (PDF) Producción de *Pleurotus ostreatus* (*Pleurotaceae*) ICFC 153/99 cultivado sobre diferentes residuos lignocelulósicos
- Environmental Protection Agency. (2020). *Sustainable materials management: 2019 data highlights*. EPA. Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures Report | US EPA
- España-Rodríguez, M., Hernández-Domínguez, E. M., Velázquez-De Lucio, B. S., Villa-García, M., & Álvarez-Cervantes, J. (2021). Productividad y análisis químico proximal de *Pleurotus* spp. crecidos sobre bagazo de *Agave salmiana* como sustrato alternativo. *Agrociencia*, 55(7), 569–581. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i7.2604>

- Figueredo-Urbina, C. J., Álvarez-Ríos, G. D., García-Montes, M. A., & Octavio-Aguilar, P. (2021). Morphological and genetic diversity of traditional varieties of agave in Hidalgo State, Mexico. *PLOS ONE*, 16(7), e0254376. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254376>
- Figueredo-Urbina, C., Medina-Pérez, G., Juárez-Muñoz, J., González-Tenorio, R., Peláez-Acero, A., & Arce-Cervantes, O. (2023). Caracterización del metzal: Una de las bondades del agave pulquero. *Xombätsi*, 2, 11–21. Figueredo-Urbina 2023 - Sociedad Mexicana de Tecnología, Ingeniería y Humanidades
- Gaitán-Hernández, R., Salmones, D., Pérez-Merlo, R., & Mata, G. (2006). *Manual práctico del cultivo de Pleurotus spp.* Instituto de Ecología A.C. manual.cdr
- Gaitan-Hernández 2014. El cultivo de hongos en México: una industria con posibilidades de diversificación. Hongos Comestibles y Medicinales en Iberoamérica. Pag 281. CAPITULO VI
https://www.researchgate.net/publication/235653414_Hongos_comestibles_y_medicinales_en_iberoamerica
- Gaitán-Hernández, Rigoberto, & Silva Huerta, Abraham. (2016). Aprovechamiento de residuos agrícolas locales para la producción de *Pleurotus* spp., en una comunidad rural de Veracruz, México. *Revista mexicana de micología*, 43, 43-47. Recuperado en 05 de febrero de 2026, de
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-31802016000100007&lng=es&tlng=es.
- Gallardo, V. J. (2017). Industria del tequila y generación de residuos. *Ciencia y Desarrollo*, 43(291), 48–53. <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=287>
- García-Calderón, N. D., Ramos-López, M. A., Rubalcava-Alejo, I., Caratachea-Aguirre, I. L., & Flores-Macías, A. (2021). Adición de alfalfa deshidratada como suplemento nutricional en sustratos para *Pleurotus ostreatus*. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 21(41), 77-86.
<https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpma/article/view/356>
- García, I. (2023, diciembre 18). Hidalgo, primer lugar nacional en producción de maguey pulquero. *El Sol de Hidalgo*. Gutierrez, T. (2017). Biodegradation of marine plastics. *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6358-6367. Hidalgo, primer lugar nacional en producción de maguey pulquero - El Sol de Hidalgo | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, Hidalgo y el Mundo
- García-Mendoza, A. (2011). *Agavaceae*. En R. Medina Lemos (Ed.), *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán* (Fascículo 88). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología.
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://www.ibiologia.unam.mx/barra/publicaciones/floras_tehuacan/2012/F88_Agav.pdf&ved=2ahUKEwi9rrLloMCSAxWIKQIHXMekKsQFnoECCYQAQ&usg=AOvVaw0F9aPbhtDgSGZSAMZOWFG8
- García-Villalpando, J. A., Castillo-Morales, A., & García-Hernández, J. L. (2001). *Diseños experimentales*. Colegio de Postgraduados. Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, Hsu y Bechhofer para selección de medias - Dialnet

- Gentry, H. S. (1982). *Agaves of continental North America*. University of Arizona Press. gentry, h. s. 1982 . agaves of continental north america. university of arizona press. <https://archive.org/details/agavesofcontinen0000gent>
- Greenacre, M. (2017). *Correspondence analysis in practice* (3rd ed.). Chapman and Hall/CRC.
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (2ª ed.). McGraw-Hill. https://apps.utel.edu.mx/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimen_tos.pdf
- Guzmán, G., Mata, G., Salmones, D., Soto-Velazco, C., & Guzmán-Dávalos, L. (2013). *El cultivo de los hongos comestibles: Con especial referencia a los hongos del género Pleurotus*. Instituto de Ecología, A.C.(PDF) El Cultivo de los Hongos Comestibles
- Guzmán-Mendoza, N. E., Osorio-Osorio, E., Hodgkin-Bastard, V. M., Vazquez-Osorno, C. G., Espitia-López, J., Flores-Chávez, B., & Garza-López, P. M. (2025). Metzal as texturizing agent in the development of barley (*Hordeum vulgare*). *Revista de educación bioquímica*. Vol.44 (Número especial).Pag. 430(XXXIV Congreso Nacional de Bioquímica) https://www.facmed.unam.mx/publicaciones/ampb/numeros/2025/especial/REB_SM_B_2025_Especial.pdf
- Hernández-Pérez, E. O., (2024). *Elaboración de quesos tipo panela con leche bovina adicionando harina de metzal* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/6017>
- HORIBA Advanced Techno. (s. f.). *Instruction Manual: LAQUAtwin Ion Selective Electrode (ISE) Pocket Meters*. Recuperado el 21 de enero de 2026, de https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Water_Quality/04_Support/Instruction_Manuals/Pocket_Meters/A-IM_-_LAQUAtwin_ISE_ALL.pdf
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis* (2nd ed.). Springer.
- Lawless, H. T., & Heymann, H. (2010). *Sensory evaluation of food: Principles and practices* (2nd ed.). Springer. Evaluación sensorial de los alimentos: principios y prácticas | Enlace de la naturaleza de Springer
- López-Martínez, M. de los Á., Garza-López, P. M., Espitia-López, V. L., & Espitia-López, J. (2025). Descriptores sensoriales de hongos endémicos *Hypomyces lactifluorum* y *Lactarius indigo* sl de Acaxochitlán, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Tecnología e Ingeniería* 4(2):53-67. <https://doi.org/10.61767/mjte.004.2.5367>
- Manilla, J. (2023, diciembre 28). Metzal, el elemento desconocido del maguey utilizado en la cocina tradicional hidalguense. *La Silla Rota*. <https://lasillarota.com/hidalgo/vida/2023/12/28/metzal-el-elemento-desconocido-del-maguey-utilizado-en-la-cocina-tradicional-hidalguense-463086.html>
- Martínez-Carrera, D., Morales, P., Sobal, M., Bonilla, M., & Martínez, W. (2000). México ante la globalización: El sistema de producción-consumo de los hongos comestibles. En *El cultivo de setas Pleurotus spp. en México* (pp. 1–20). ECOSUR–CONACYT. Draft

- Martínez-Gutiérrez, G. A., Tinoco, C. E., & Ortiz-Hernández, Y. D. (2005). CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y BIOLÓGICA DEL BAGAZO RESIDUAL DE LA INDUSTRIA DEL MEZCAL PARA UTILIZARSE COMO SUSTRATO DE CULTIVO SIN SUELO DE HORTALIZAS. *INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL*. Oaxaca: CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA. 20051234_3588.pdf
- Meilgaard, M., Civille, G. V., & Carr, B. T. (2016). *Sensory evaluation techniques* (5th ed.). CRC Press.
https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781482216912_A37870469/preview-9781482216912_A37870469.pdf
- Méndez Ventura, L. M. (2020). Manual de prácticos de Análisis de Alimentos. Xalapa, Veracruz. México: Universidad Veracruzana. <https://www.uv.mx/qfb/files/2020/09/Manual-Analisis-de-Alimentos-1.pdf>
- Narváez Suárez, A. U., Martínez Saldaña, T., & Jiménez Velázquez, M. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista De Geografía Agrícola*, (56), 33–44.
<https://doi.org/10.5154/r.rga.2016.56.005>
- Ozcariz-Fermoselle, M. V., Fraile-Fabero, R., Girbés-Juan, T., Arce-Cervantes, O., Oria de Rueda-Salgueiro, J. A., & Azul, A. M. (2018). Use of lignocellulosic wastes of pecan (*Carya illinoensis*) in the cultivation of *Ganoderma lucidum*. *Revista iberoamericana de micología*, 35(2), 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2017.09.005>
- Ozcariz-Fermoselle, M. V., De Vega-Luttmann, G., Lugo-Montero, F., Galhano, C., & Arce-Cervantes, O. (2019). Promoting circular economy through sustainable agriculture in Hidalgo. Recycling of Agro-Industrial Waste for Production of High Nutritional Native Mushrooms In ClimateChanfe-Resilient Agriculture and Agroforestry (pp.455_469) Springer, Cham. 10.1007/978-3-319-75004-0_26
https://www.researchgate.net/publication/330621619_Promoting_Circular_Economy_Through_Sustainable_Agriculture_in_Hidalgo_Recycling_of_Agro-Industrial_Waste_for_Production_of_High_Nutritional_Native_Mushrooms#:~:text=Abstract%20and%20Figures,and%20one%20Pleurotus%20opuntiae%20strain.
- Peralta-García I, González-Muñoz F, Elena RM, Sánchez-Flores A, López Munguía A. Evolution of Fructans in Aguamiel (Agave Sap) During the Plant Production Lifetime. *Front Nutr*. 2020 Oct 8;7:566950. doi: 10.3389/fnut.2020. 566950. PMID: 33163505; PMCID: PMC7581979.
- Piña-Guzmán, A. B., Nieto-Monteros, D. A., & Robles-Martínez, F. (2016). Utilización de residuos agrícolas en *Pleurotus*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(Especial), 141–151. Vista de UTILIZACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y AGROINDUSTRIALES EN EL CULTIVO Y PRODUCCIÓN DEL HONGO COMESTIBLE SETA (*Pleurotus* spp.)
- Portilla-Segura, A., Romero-Arenas, O., Valencia de Ita, M. d., Hernández-Espinosa, M. Á., Lanteta-Cortés, G., & Rivera-Tapia, J. A. (2019). Determinación de los parámetros de productividad de cepas de *Pleurotus ostreatus* y *P. opuntiae* cultivadas en paja de trigo

y pencas de maguey combinadas con sustratos agrícolas. *SCIENTIAFUNGORUM*, 49:e1216. <https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1216>

- Puig-Fernández, Y., Crespo-Zafra, L. M., Cardona-Soberao, Y. R., Matos-Mosque da, L., & Serrano-Alberni, M. (2020). Evaluación de tres residuos agroindustriales como sustratos para cultivo del *Pleurotus ostreatus* var. Florida: artículo de investigación. Revista científica multidisciplinaria arbitrada Vachasun, 4(7), 164–176. EVALUACIÓN DE TRES RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO SUSTRATOS PARA CULTIVO DEL PLEUROTUS OSTREATUS VAR. FLORIDA: Artículo de investigación | REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINARIA ARBITRADA YACHASUN - ISSN: 2697-3456
- Ramírez-Carrasco, J., Mata, G., & Salmones, D. (2010). Variabilidad productiva de cepas silvestres de *Pleurotus* asociadas a *Agave spp.* *Revista Mexicana de Micología*, 31, 21–30. Recursos genéticos de los hongos del maguey (*pleurotus sp*) de la región central de México: caracterización y selección de genotipos con potencial para la producción rural
- Ramírez-Rodríguez, R. (2021). La especialización agrícola de la región de los llanos de Apan. El surgimiento del cultivo del maguey de aguamiel (Siglos XVI-XVIII). *Estudios de Historia novohispana*, 64, 41-84. Vocabulario náhuatl Maguey Pulque - Gerardo Bravo Vargas: Gerardo Bravo Vargas: Descarga, Préstamo y Streaming Gratuitos: Internet Archive
- Reyes-Agüero, J.A., B. Peña-Valdivia, R. Aguirre-Rivera, R. y J. Mora-López. 2019. Intraspecific variation of *Agave mapisaga* Trel. and *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck. (Asparagaceae) related to ancestral usages at the Hñähñu region in central Mexico. *Agrociencia* 53, 563–579. <https://share.google/xNEMkbSJSw6FQLGVV>
- Rodríguez, G. E., Martínez, D. A., Buglione, M. B., Filippi, M. V., & Agüero, M. S. (2018). Cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.: Fr.) Kummer sobre orujo de pera: Evaluación de la productividad y composición química del sustrato biodegradado. *Anales de Biología*, 40, 21-30. <https://doi.org/10.6018/analesbio.40.03>. https://www.um.es/analesdebiologia/numeros/40/PDF/40_2018_03.pdf
- Royse, D., 1989. Factors Influencing the Production Rate of Shiitake. *MushJ. Tropics*. 9: 127-138. Producción de setas especiales en Norteamérica: Shiitake y colmenillas | Enlace de la naturaleza de Springer
- Royse, D. d., y Sánchez, J. E. (2017). Producción mundial de setas *Pleurotus spp.* con énfasis en países iberoamericanos. *El Colegio de la Frontera Sur*. Tapachula, 17-25 https://www.researchgate.net/profile/Jose-Sanchez-104/publication/321686533_La_Biologia_el_cultivo_y_las_propiedades_nutricionales_y_medicinales_de_las_setas_Pleurotus_spp/links/5a2af33c45851552ae7a84bf/La-Biologia-el-cultivo-y-las-propiedades-nutricionales-y-medicinales-de-las-setas-Pleurotus-spp.pdf
- Sahagún, B. (1989). Historia general de las cosas de la Nueva España (41.a ed.). Porrúa. 419 comentarios de María Guadalupe Bosch de Souza. En https://www.researchgate.net/publication/354863247_Etnografia_y_Descripcion_el_discurso_etnografico_en_la_historia_general_de_las_cosas_de_la_Nueva_Espana_de_Fray_Bernardino_de_Sahagun
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro. *Biotechnología y Bioingeniería*, 16(1,2), 14-46. <https://smbb.mx/wp->

content/uploads/2017/10/Revista_2012_V16_n2.pdf https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista_2012_V16_n2.pdf?utm_source

- Severiano-Pérez, P. (2019). Evaluación sensorial. *Interdisciplina*, 7(19), 47–68. Repositorio del CEIICH: ¿Qué es y cómo se utiliza la evaluación sensorial?
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). Estadística de producción agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). Estadística de producción agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://nube.agricultura.gob.mx/datosAbiertos/Agricola.php>
- Singh, J., Kalamdhad, A. S., & Ali, M. (2022). Journal of Environmental Management, 305, 114391. Journal of Environmental Management | Vol 305, 1 March 2022 | ScienceDirect.com by Elsevier
- Stamets, P. (2000). Growing Gourmet and Medicinal Mushrooms. Berkeley: TenSpeed Press.
- Stone, H., & Sidel, J. L. (2004). *Sensory evaluation practices* (3rd ed.). Academic Press Prácticas de evaluación sensorial | ScienceDirect
- Trejo, L., Luz-Velázquez, M. L., Vallejo, M., & Adriana, M. (2022). Journal of Ethnobiology, 42, 315–330. Journal of Ethnobiology - Volumen 42, Número 1
- Trejo, L. E. (2021, 16 de julio). Hidalgo, primer lugar nacional en producción de maguey pulquero. *El Sol de Hidalgo*. <https://oem.com.mx/elsoldehidalgo/local/hidalgo-primer-lugar-nacional-en-produccion-de-maguey-pulquero-17450454>
- Valenzuela-Pérez, J. J., Hernández-Vázquez, O. I., & Valenzuela-Solís, S. J. (2021). Evaluación de diferentes sustratos para la producción de *Pleurotus cornucopiae*. Journal CIM (Coloquio de Investigación Multidisciplinaria), 9(1), 1076-1082. https://www.researchgate.net/publication/360099144_Evaluacion_de_diferentes_sustratos_para_la_produccion_de_Pleurotus_cornucopiae
- Velázquez-De Lucio, B. S., Hernández-Domínguez, E. M., Falcón-León, M., Téllez-Jurado, A., & Álvarez-Cervantes, J. (2024). Revalorization of degraded maguey pulquero substrate for *Lycopersicon esculentum* germination. *Current Research in Microbial Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100283>
- Varela, P., & Ares, G. (2012). Sensory profiling. *Food Quality and Preference*, 25(2), 174–185. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950268812000500>
- Valverde, M. E., Hernández-Pérez, T., & Paredes-López, O. (2015). International Journal of Microbiology, 2015, 1–14. Setas comestibles: mejora de la salud humana y promoción de la calidad de vida – PubMed
- Vázquez-Osorno, C. G., De Vega-Luttmann, G., Arce-Cervantes, O., Espitia-López, J., Flores-Chávez, B., & Garza-López, P. M. (2023). *Memorias del XX Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*.

- Vázquez-Osorno, C. G., Espitia-López, J., Arce-Cervantes, O., Angel-Cuapio, Flores-Chávez, B., & Garza-López, P. M. (2025). Revaluation of metzal residue as a texturizing agent in the vegetative development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) Revista de educación bioquímica. Vol.44 (Número especial).Pag. 533(XXXIV Congreso Nacional de Bioquímica)https://www.facmed.unam.mx/publicaciones/ampb/numeros/2025/especial/REB_SMB_2025_Especial.pdf
- Veloz-Badillo, J. J., Juárez-Muñoz, J., Medina-Pérez, G., & Figueredo-Urbina, C. (2019). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10(4), 821–833.Vol. 10 Núm. 1 (2019) | Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas
- Veloz Badillo, G. M. (2025). Efecto de la actividad endófito del hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana* debido a diferentes métodos de inoculación [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo].
- XLSTAT by Lumivero®. (2023). *XLSTAT statistical software* (versión 2023).
- XLSTAT by Lumivero®. (2024). *XLSTAT statistical software* (versión 2024).
- XLSTAT by Lumivero®. (2024). *XLSTAT Sensory* (versión 2024.4).
- Yepes, S. M., Montoya Naranjo, L. J., & Orozco Sánchez, F. (2008). VALORIZACIÓN DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES - FRUTAS - EN MEDELLÍN Y EL SUR DEL VALLE DEL ABURRÁ, COLOMBIA. Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, 61(1), 4422-4431. <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179914077018.pdf>
- Zhuang, J., Xiao, Q., Feng, T., Huang, Q., Ho, C., & Song, S. (2020). Comparative flavor profile analysis of four different varieties by instrumental and sensory techniques. Food Research International, 136, Artículo 109485. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109485>