



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

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

**TESIS DE MAESTRÍA**

**POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE HONGO DE  
MAGUEY (*Pleurotus agaves* Dennis).**

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

**PRESENTA**

**Ing. José Guadalupe Martínez Martínez**

**Director**

Dr. Oscar Arce Cervantes

**Codirector**

Dr. Luis Alberto Miranda Romero

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México, a 7 de febrero de 2023





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE HIDALGO

---

INSTITUTO CIENCIAS DE AGROPECUARIAS

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

**TESIS DE MAESTRÍA**

**POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE HONGO DE  
MAGUEY (*Pleurotus agaves* Dennis).**

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

**PRESENTA**

Ing. José Guadalupe Martínez Martínez

**Director**

Dr. Oscar Arce Cervantes

**Codirector**

Dr. Luis Alberto Miranda Romero

**Asesores**

Dr. Clemente Villanueva Verduzco

Dr. Víctor Hugo Pérez España

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México, a 07 de febrero de 2024



**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo**

**Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable**

Tulancingo de Bravo a 07 de febrero de 2024

Los que suscriben hacemos constar que el trabajo de tesis de la Maestría en Ciencias y Tecnología Agrícola y Forestal Sustentable titulado "**POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE HONGO DE MAGUEY (*Pleurotus agaves* Dennis)**" realizada por el Ing. **José Guadalupe Martínez Martínez**, ha sido revisada minuciosamente y haciéndose las correcciones pertinentes manifestamos nuestra aprobación para que el mencionado trabajo se imprima.



---

Dr. Oscar Arce Cervantes

Director de Tesis



---

Dr. Luis Alberto Miranda Romero

Codirector



---

Dr. Clemente Villanueva Verduzco

Asesor



---

Dr. Víctor Hugo Pérez España

Asesor



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: "POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE HONGO DE MAGUEY (*Pleurotus agaves* Dennis).", que desarrolla el estudiante JOSÉ GUADALUPE MARTÍNEZ MARTÍNEZ.

#### Asistentes:

Dr. Oscar Arce Cervantes

Dr. Luis Alberto Miranda Romero

Dr. Clemente Villanueva Verduzco

Dr. Víctor Hugo Pérez España

#### A. Revisión de Trabajo de Tesis

##### Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por JOSÉ GUADALUPE MARTÍNEZ MARTÍNEZ, comunicando el 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.

**A T E N T A M E N T E**  
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo 7 de febrero de 2024.

Dr. Oscar Arce Cervantes

Dr. Luis Alberto Miranda Romero

Dr. Clemente Villanueva Verduzco

Dr. Víctor Hugo Pérez España



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](http://www.uaeh.edu.mx)

# AGRADECIMIENTOS

---

## **A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.**

Institución tan noble que me abrió las puertas para acceder a una educación en posgrado, una educación a la que pocos pueden acceder. *“Es un honor ser Garza”*

## **A la Universidad Autónoma Chapingo.**

A la primera institución que me ofreció, un hogar, me brindo una educación media, superior y ahora un empleo; y aún con todo esto me permitió seguirme preparando profesionalmente. *“Toros salvajes por siempre”*

## **A mi tutor**

Dr. Oscar Arce Cervantes. Sin usted y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado. Usted formó parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas. Gracias por sus orientaciones.

## **A mis docentes y asesores**

Sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes mis profesores queridos, les debo mis conocimientos. Donde quiera que vaya, los llevaré conmigo en mí transitar profesional. Su semilla de conocimientos germinó en el alma y el espíritu. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia *“mucho tolerancia”*.

## **Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ahora Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías**

CONAHCyT institución tan noble que me permitió seguir mi formación académica en el programa de posgrados de calidad y por el financiamiento de otorgado.

## DEDICATORIA

---

A la trinidad de las mujeres más importantes en mi vida: mi madre Martha, mi Tía Sanjuana (mi madre de crianza) y a mi abuela Amelia†.

Ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre en mi mente en los días y noches más difíciles durante mis horas de trabajo y estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro, como una meta más conquistada. Gracias por ser quienes son y por creer en mí siempre.

### **A mi padre Mario†.**

Porque fuiste el que siempre confió en mí, y aunque ya llevo varios años sin ti, siempre estás presente, gracias por darme la primera educación de mi vida y por enseñarme a trabajar duro y crecer desde abajo, con la cara en alto; y ser el recordatorio eterno de mi origen. Este logro te lo debo a ti papá.

### **A la persona más importante en mi vida.**

Porque llegaste tarde en mi vida, pero en el momento preciso, de aquí al final del tiempo. Gracias por compartir tu vida conmigo.

## INDICE

---

INTRODUCCIÓN .....	1
REINO FUNGI.....	1
GENERALIDADES .....	1
CLASIFICACIÓN Y TAXONOMÍA DE LOS HONGOS.....	2
IMPORTANCIA DE LOS HONGOS.....	10
IMPORTANCIA ECOLÓGICA.....	10
IMPORTANCIA CULTURAL.....	11
HONGOS COMO RECURSOS GENÉTICOS.....	11
HONGOS EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS.....	12
Hongos silvestres .....	12
Hongos cultivados .....	13
PRODUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	16
Los rumiantes y los gases de efecto invernadero.....	16
Ambiente Ruminal .....	17
Productos de la fermentación.....	17
Producción y destino metabólico del H <sub>2</sub> .....	18
Metanogénesis Ruminal .....	19
Arqueas Metanogénicas.....	20
ANTECEDENTES .....	21
EL GÉNERO <i>Pleurotus</i> .....	21
Especies de interés del género <i>Pleurotus</i> .....	22
Aprovechamiento biotecnológico de <i>Pleurotus</i> .....	24
Usos industriales de <i>Pleurotus</i> .....	24
Cinética de crecimiento y producción de biomasa.....	25

Metabolitos secundarios en <i>Pleurotus</i> .....	26
Producción de hongos como alimentos funcionales .....	27
Procesamiento y estabilidad.....	27
Regulaciones y seguridad alimentaria .....	27
Usos en biorremediación y biocombustibles .....	28
Biocombustibles.....	28
<i>Pleurotus</i> en la alimentación animal.....	28
Producción de hongos comestibles.....	30
OBJETIVOS .....	33
General .....	33
Objetivos Específicos .....	33
HIPÓTESIS .....	34
MATERIALES Y METÓDO .....	35
MATERIAL BIOLÓGICO.....	35
Cultivo <i>invitro</i> .....	35
Generación del inóculo .....	37
Producción de Esporomas y calculo de eficiencia biologica .....	38
Elección de sustratos .....	38
Preparación de sustratos.....	39
Inoculación.....	39
Incubación .....	39
Toma de muestras de sustrato.....	40
Fructificación.....	40
Cálculos de eficiencia biológica.....	41

Técnica de producción de gases por fermentación in vitro y estimación de indicadores de impacto ambiental. ....	41
Manejo de sustratos .....	41
Solución mineral reducida (SMR).....	42
Solución mineral (SM) .....	42
Solución reductora.....	43
Origen del líquido ruminal.....	43
Vaciado de frascos .....	43
Cinética de producción de gas .....	44
Fermentación para la estimación de composición de los gases.....	45
Digestibilidad de la materia seca (DMS) .....	46
Diseño Experimental.....	47
Análisis Estadístico .....	48
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	50
CONCLUSIÓN .....	65
BIBLIOGRAFÍA .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Árbol filogenético de la vida en seis reinos de la vida .....	3
Figura 2. <i>Rhizophyidium</i> sp. Representantes del filo Chytridiomycota .....	4
Figura 3. Diversidad de zoosporas de Zygomycota .....	5
Figura 4. Diversidad de la morfología del talo y el esporangio de Blastocladiomycota .....	6
Figura 5. Parte de una colonia de Glomeromycota, hifas, arbuscúlos y vesículas. ....	7
Figura 6. Vista general de <i>Sclerotinia</i> sp. un representante típico de Ascomycota. Vista general del ascocarpo (apotesio), ascas con 8 ascosporas ...	8
Figura 7. Diversidad de Basidiomas de Basidiomycota .....	9
Figura 8. Elaboración de medios de cultivo .....	35
Figura 9. Vertido de medio de cultivo .....	35
Figura 10. Inicio de desarrollo micelial en dos ejes .....	36
Figura 11. Grano de trigo, estéril para inocula .....	37
Figura 12. Inicio del desarrollo micelial en grano .....	37
Figura 13. Inoculo maduro y activo de cepas de interés .....	38
Figura 14. Unidades experimentales en incubación .....	39
Figura 15. A fructificación de <i>Pleurotus agaves</i> , B fructificación de <i>Pleurotus ostreatus</i> y C fructificación de <i>Pleurotus djamor</i> .....	40
Figura 16. Procesamiento de líquido ruminal .....	43
Figura 17. Flujo de CO <sub>2</sub> en unidades experimentales y baño maría para fermentación <i>in vitro</i> .....	44
Figura 18. Lectura de presión de gas producido en fermentación .....	44
Figura 19. Se muestran las versiones y las licencias de los programas estadísticos usados .....	45
Figura 20. Morfología colonial de <i>Pleurotus agaves</i> (A), <i>Pleurotus ostreatus</i> (B) y <i>Pleurotus djamor</i> (C) .....	46
Figura 21. Producción acumulada de gas en fermentación invitro de rastrojos tratados con <i>Pleurotus</i> a 72 hrs .....	57

## ÍNDICE DE CUADROS

---

Cuadro 1. Composición de Stoks para fermentación <i>in vitro</i> .....	42
Cuadro 2. Comparación de la velocidad de crecimiento radial (mm/h) de <i>Pleurotus agaves</i> , <i>P. ostreatus</i> y <i>P. djamor</i> .....	51
	53
Cuadro 3. Eficiencia biológica (%) de especies de <i>Pleurotus</i> .....	
Cuadro 4. Cinética de producción de gas .....	56
Cuadro 5. Fracciones fermentables de rastrojos de maíz tratados con hongo del género <i>Pleurotus</i> a diferentes tiempos post invasión total .....	59
Cuadro 6. Producción de gases de efecto invernadero e indicadores de impacto ambiental de rastrojos de maíz tratados con varias especies de <i>Pleurotus</i> .....	62

## RESUMEN

---

El estudio se centra en el hongo de maguey *Pleurotus agaves* y su comparación con otros hongos de importancia comercial *P. ostreatus* y *P. djamor* en el documento se revela su potencial biotecnológico en la valorización del rastrojo de maíz. Se observan diferencias significativas en términos de crecimiento radial, rendimiento, producción de gases de efecto invernadero y digestibilidad del sustrato. Los datos sugieren que *P. ostreatus* exhibe la mayor velocidad de crecimiento, con  $0.1518 \pm 0.0049$  mm/h, seguido por *P. djamor* con  $0.1287 \pm 0.1260$  mm/h, mientras que *P. agaves* muestra la tasa más baja de crecimiento radial, con  $0.0878 \pm 0.0159$  mm/h. Además, *P. agaves* presenta una eficiencia biológica comparable a *P. ostreatus* y superior a *P. djamor*, con una Eficiencia Biológica Total (EBt%) de 100.3% y una Eficiencia Biológica Total Real (EBtr%) de 12.25%, en comparación con *P. ostreatus* con 81.89% EBt y 9.949% EBtr, y *P. djamor* con 45.89% EBt y 5.592% EBtr.

En cuanto a la producción de gases de efecto invernadero, se observa que *P. djamor* y *P. ostreatus* muestran un mayor potencial para la producción de metano y la digestibilidad del sustrato en comparación con *P. agaves*. El volumen total de gas producido por *P. djamor* a las 24 horas es de  $146.94 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{MS}$ , superando significativamente al rastrojo bruto con  $42.24 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{MS}$ . Por otro lado, *P. agaves* presenta una disminución significativa en el volumen total de gas producido a medida que aumenta el tiempo de fermentación, con  $116.38 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{MS}$  a las 24 horas y  $107.99 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{MS}$  a las 312 horas.

Estos resultados resaltan el interés en investigaciones futuras para optimizar el rendimiento de *P. agaves* y explorar su potencial en otras aplicaciones biotecnológicas, como la producción de enzimas, compuestos bioactivos o biocombustibles. La capacidad de *P. agaves* para aprovechar eficientemente los sustratos disponibles en la región y su adaptación a las condiciones ambientales locales la convierten en una opción prometedora para la valorización de residuos agroindustriales y el desarrollo de una industria de hongos comestibles más eficiente.

## ABSTRACT

---

The study focuses on the maguey fungus *Pleurotus agaves*, and its comparison with other commercially important fungi *P. ostreatus* and *P. djamor* reveals its biotechnological potential in maize stubble valorization. Significant differences are observed in terms of radial growth, yield, greenhouse gas production, and substrate digestibility. The data suggests that *P. ostreatus* exhibits the highest growth rate, at  $0.1518 \pm 0.0049$  mm/h, followed by *P. djamor* at  $0.1287 \pm 0.1260$  mm/h, while *P. agaves* shows the lowest radial growth rate, at  $0.0878 \pm 0.0159$  mm/h. Additionally, *P. agaves* demonstrates biological efficiency comparable to *P. ostreatus* and superior to *P. djamor*, with a Total Biological Efficiency (EBt%) of 100.3% and a Real Total Biological Efficiency (EBtr%) of 12.25%, compared to *P. ostreatus* with 81.89% EBt and 9.949% EBtr, and *P. djamor* with 45.89% EBt and 5.592% EBtr.

Regarding greenhouse gas production, it is observed that *P. djamor* and *P. ostreatus* show a greater potential for methane production and substrate digestibility compared to *P. agaves*. The total gas volume produced by *P. djamor* at 24 hours is  $146.94 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}\text{MS}$ , significantly exceeding raw stubble with  $42.24 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{MS}$ . On the other hand, *P. agaves* exhibits a significant decrease in total gas volume produced as fermentation time increases, with  $116.38 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}\text{MS}$  at 24 hours and  $107.99 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}\text{MS}$  at 312 hours.

These findings underscore the interest in future research to optimize the performance of *P. agaves* and explore its potential in other biotechnological applications, such as enzyme production, bioactive compound synthesis, or biofuel generation. The ability of *P. agaves* to efficiently utilize available substrates in the region and its adaptation to local environmental conditions make it a promising option for the valorization of agroindustrial waste and the development of a more efficient edible mushroom industry.



## INTRODUCCIÓN

---

### REINO FUNGI

Los representantes del reino fungi, de la misma forma que los animales, son organismos heterótrofos, lo que significa que deben obtener su alimento de otros organismos, pero a diferencia de los animales estos son heterótrofos absorbentes. Los hongos tienen un ciclo de vida con alternancia de generaciones donde domina la fase haploide. Sus células tienen dos núcleos durante la mayor parte de su ciclo vital. En su mayoría, presentan estructuras somáticas filamentosas y ramificadas. La molécula de almacén de carbohidratos es el glucógeno misma molécula presente en los animales, las paredes celulares formadas de quitina, en algunos grupos inferiores de celulosa o ambas. Por la forma de nutrición se consideran organismos heterótrofos absorbentes, en cuestión a la reproducción se presenta la reproducción somática, así como la formación de esporas sexuales y asexuales. Son organismos carentes de clorofila lo que los aleja evolutivamente aún más de los animales. A lo largo de su evolución, los hongos han desarrollado diversas estrategias de sobrevivencia como la dispersión efectivas y múltiples mecanismos para este fin, convirtiéndose en un grupo megadiverso cuya distribución se extiende en prácticamente todos los ecosistemas del mundo (Heredia-Abarca, 2020; Salazar-Vidal, 2016).

### GENERALIDADES

El estudio sistemático de los hongos tiene sólo 250 años de historia. Los hongos son organismos eucariotas filogenéticamente más cercanos a los animales que a las plantas, compartiendo ancestros con el reino Animalia. Se encuentran en casi todos los hábitats colonizando diversos sustratos como suelo, agua, plantas y residuos orgánicos. La existencia de estos organismos se conoce desde hace siglos. Con base en la diversidad vegetal global, se estima que existen entre 1.5 y 2.5 millones de especies fúngicas. En México podría haber alrededor de 200 mil especies, de las



cuales se conocen aproximadamente 7 mil. La descripción de los hongos se fundamenta en características morfológicas y fisiológicas, como eucariotas mayormente filamentosos que forman micelios, heterótrofos por absorción, diferenciándolos de otros eucariotas. Tienen un ciclo vital con alternancia de generaciones, dominando la fase haploide. Se propagan por esporas sexuales (meiosis) y asexuales (mitosis). Debido a su metabolismo participan en diversos ecosistemas como micorrizas, patógenos o degradadores, pudiendo dañar cultivos, pero muchos son beneficiosos para el hombre en agricultura e industrias farmacéutica y alimentaria (Azevedo & Barata, 2018; Cano-Estrada & Romero-Bautista, 2016; Zapata, 2021).

### **CLASIFICACIÓN Y TAXONOMÍA DE LOS HONGOS**

La historia evolutiva de plantas y hongos sugiere una evolución a partir de procariotas unicelulares hacia eucariotas complejos y pluricelulares. La evolución fúngica y vegetal muestra una clara respuesta a los aumentos en las concentraciones de oxígeno en la hidrósfera y atmósfera, acompañada del desarrollo de ciclos sexuales y alternancia de generaciones. Estos fueron procesos que sentaron las bases de la evolución a partir de varios grupos de algas, seguido de la invasión del medio terrestre, el desarrollo de hongos, briofitas y posteriormente plantas vasculares como principales líneas evolutivas (Grisales, 2017). El uso empírico de los hongos se remonta a varios miles de años antes de nuestra era en África y Asia, expandiéndose luego al resto del mundo. En el siglo XVIII surge la micología como ciencia en Europa. Desde entonces hasta hoy se ha contribuido al conocimiento de los hongos. Así, el médico holandés Hadrianus Junius escribió la primera publicación sobre el género *Phallus*, *Carolus* y *Clusius* así como otros botánicos propusieron la clasificación de varios hongos más. Luego continuaron avances científicos hasta que Carlos Linneo propuso la nomenclatura binaria para clasificar especies y los hongos comenzaron a conocerse por sus nombres científicos. Los científicos Christiaan Hendrik Persoon y Elías Magnus Fries son considerados pioneros en trabajos taxonómicos sobre la clasificación de hongos de



acuerdo a su morfología y fisiología (Kuhar et al., 2013; Salazar-Vidal, 2016). En la actualidad es aceptada la clasificación general de seis reinos como (Figura 1).

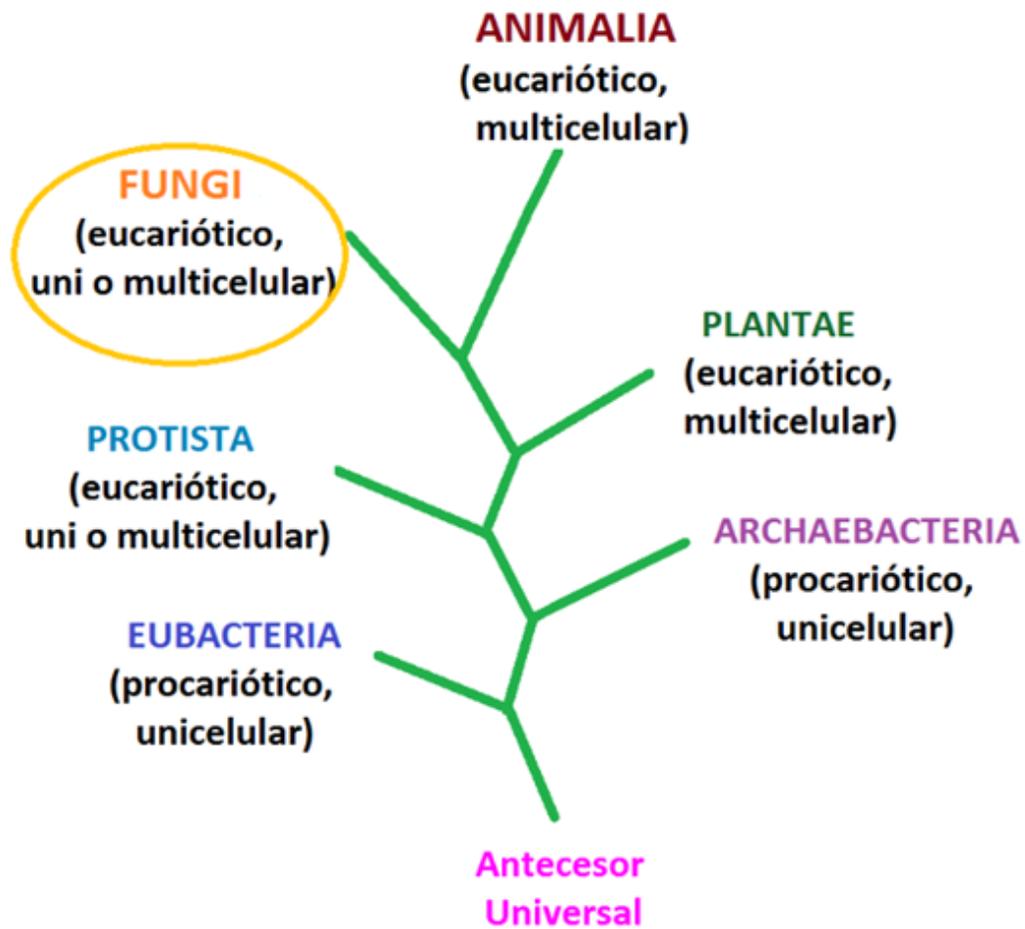


Figura 1. Árbol filogenético de la vida en seis reinos de la vida (Salazar-Vidal, 2016)

De acuerdo a Salazar-Vidal, (2016), al igual que los demás seres vivos, los hongos se agrupan sistemática y jerárquicamente en *taxa*: Clases, Órdenes, Familias y Géneros. Estos clasifican a los especímenes desde grupos que comparten características muy generales a nivel de Reino, hasta aquellos que comparten rasgos muy específicos. Existen diversas clasificaciones según los autores y criterios manejados, sin embargo, a continuación, se muestran las divisiones fúngicas más importantes:



**Filo Chytridiomycota:** Es el grupo más antiguo en los cuales el registro fósil data del Devónico. Estos hongos son unicelulares de ambientes acuáticos o terrestres muy húmedos. Son los únicos hongos verdaderos (Eumycota) con pared celular de quitina y que forman células móviles y flageladas. Su talo es simple unicelular o sinfonola capaz de formar micelio. Su reproducción sexual puede ocurrir por isogamia, anisogamia, gametangiogamia, oogamia o somatogamia. Por lo general suelen ser saprófitos o parásitos en microalgas, plantas, vertebrados e invertebrados y no sobrepasan las 1 000 especies (Figura 2 (Hassett et al., 2020))

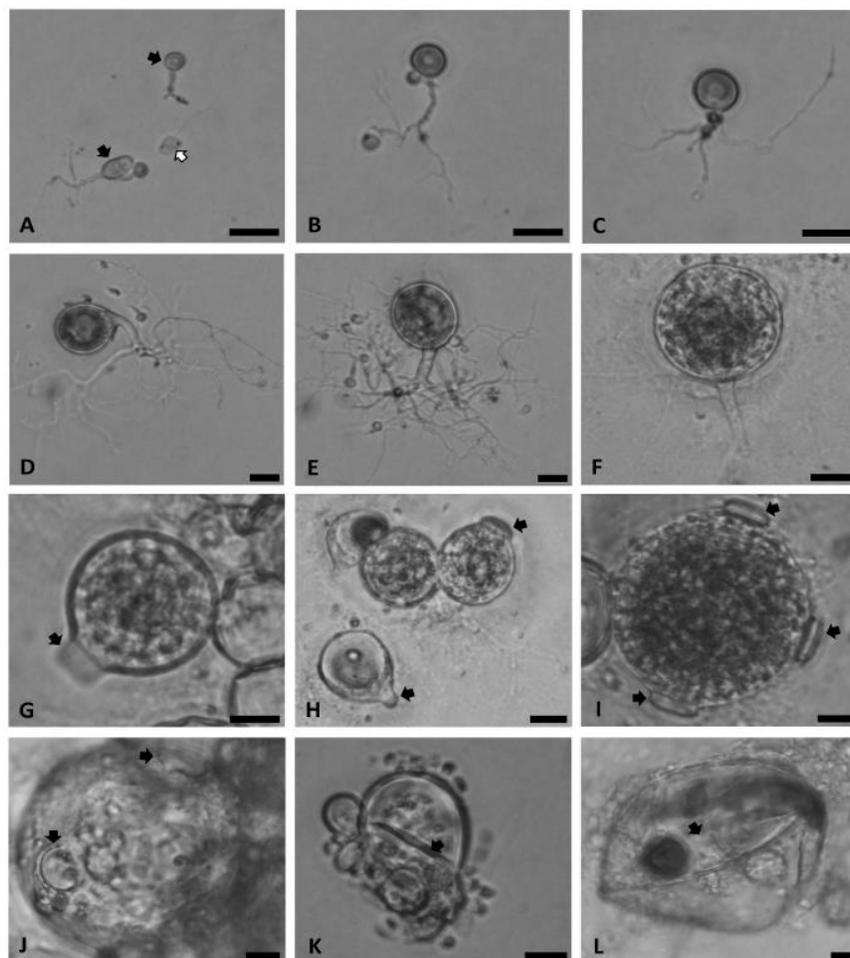


Figura 2. *Rhizophydium* sp. Representantes del filo Chytridiomycota

(Hassett et al., 2020)



**Filo Zygomycota:** Son hongos productores de zoosporas (Figura 3. White et al., 2006), que se encuentran en los suelos y recientemente, también se reportan en estiércoles y ambientes montañosos, ampliando considerablemente el rango de hábitats de estos hongos. Con alrededor de 1 100 especies, estos hongos son organismos de nutrición saprófita o parásita, que se alimentan de restos de plantas y animales del suelo. En términos evolutivos, se consideran los primeros hongos terrestres verdaderos. Son hongos terrestres que forman hifas, micelios y esporangios. Su reproducción sexual ocurre por gametangiogamia y la formación de zigósporas, mientras que la reproducción asexual se da a través de esporangios. Sus esporas son anemócoras, es decir, se dispersan a través del viento.

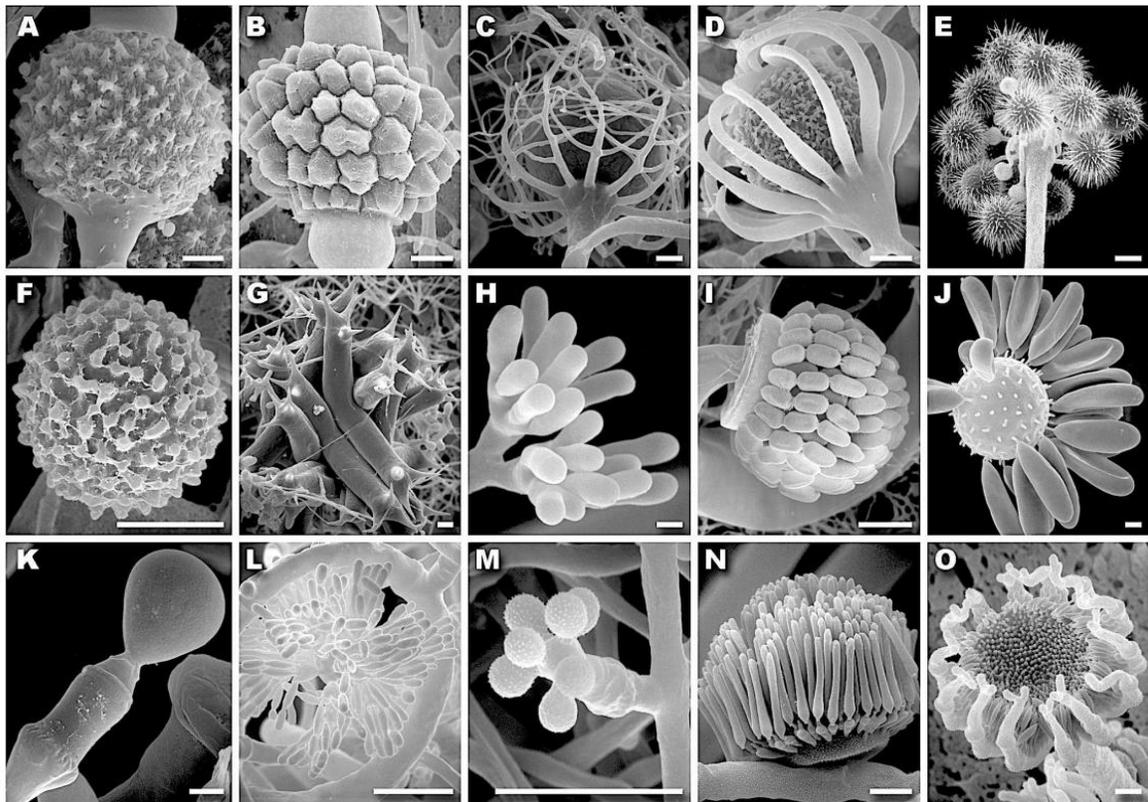


Figura 3. Diversidad de zoosporas de Zygomycota

(White et al., 2006)



**Filo Blastocladiomycota:** Este grupo de hongos de hábitat acuático o que viven en el suelo muy húmedo como sapróbios sobre los restos de animales y plantas en el suelo y el agua. Poseen un micelio verdadero, forman esporangios de resistencia con pared gruesa y reproducción sexual por copulación de planogametos. La reproducción asexual se da por medio de zoosporas (Figura. 4). Estos hongos presentan un talo sifonal, es decir, desprovisto de tabiques individuales que definen las células, aunque en algunos casos podemos encontrar al final de las hifas. Poseen zoosporas uniflageladas con flagelo tipo látigo.

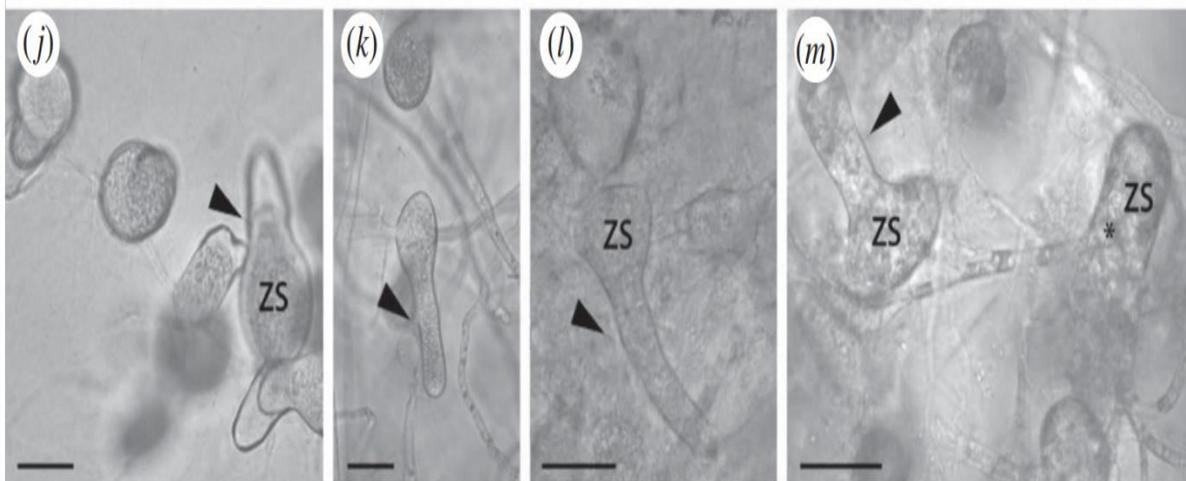


Figura 4. Diversidad de la morfología del talo y el esporangio de Blastocladiomycota.

(Strullu-Derrien et al., 2018)

**Filo Glomeromycota:** cuenta con 200 especies aproximadamente, antes fueron considerados como Zygomycota; sin embargo, datos ecológicos y moleculares sugieren una División propia. Estos seres microscópicos han sido testigos silenciosos de la evolución de la vida en nuestro planeta. Según los registros fósiles, estos hongos han estado presentes en la Tierra desde hace al menos 460 millones de años, remontándose al periodo Ordovícico. Son estrictamente asexuales, ya que sólo presentan propagación somática. El 95% de estos hongos forman endomicorrizas arbusculares con las raíces de las plantas vasculares (Figura 5). Además de



presentar una simbiosis micorrícica obligatoria, los hongos de la División Glomeromycotase, se diferencian de otros hongos por el gran tamaño de sus esporas con varios núcleos y sus hifas no septadas. No forman cuerpos fructíferos, sus estructuras se revelan sólo al microscopio.

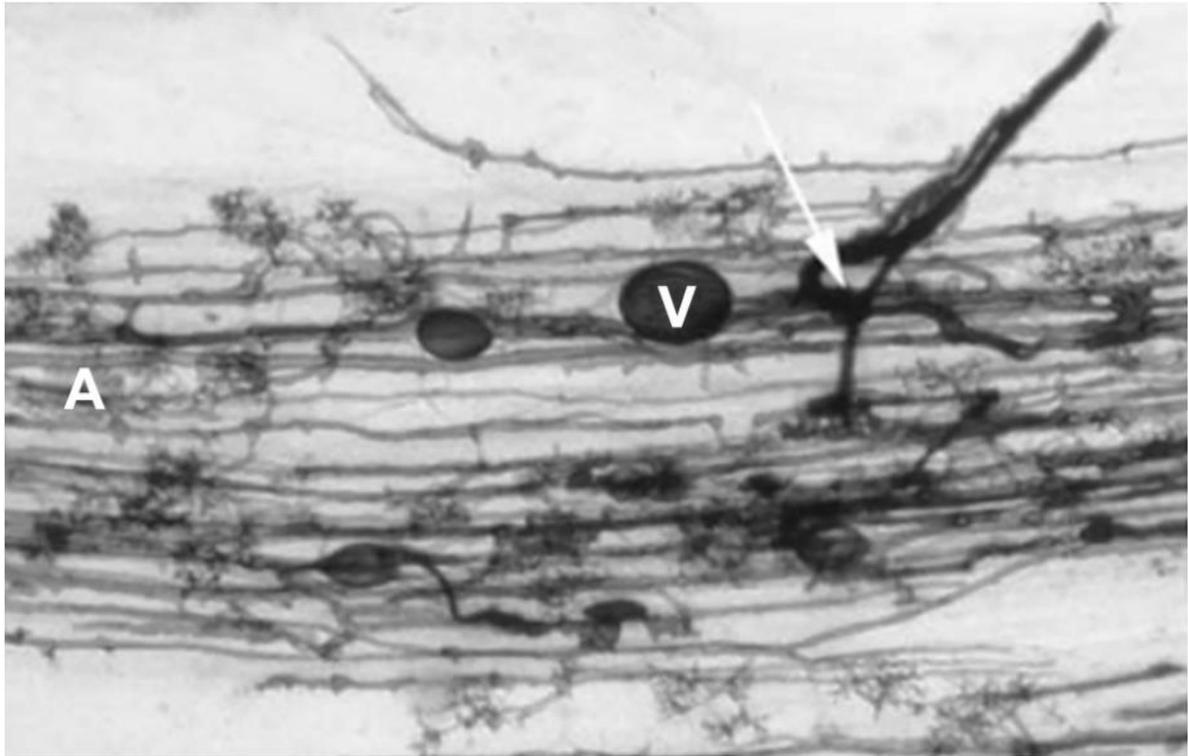


Figura 5. Parte de una colonia de Glomeromycota, hifas, arbusculos y vesículas.

(Matos et al., 2022)

**Filo Ascomycota:** filo más grande de los hongos, que contiene alrededor de 94,000 que corresponde cerca del 63 % y comprende especies muy diversas en sus ciclos de vida; económica y ambientalmente importantes, como mutualistas y patógenos de plantas y animales, saprobios y líquenes (Hill et al., 2021). Grupo muy diverso en la que podemos encontrar a las levaduras, ascomicetos primitivos sin hifas septadas o raramente, unicelulares o formando cadenas cortas, saprobios sobre sustratos ricos en azúcares o parásitos. En este filo están las levaduras se utilizan para la producción de alimentos, como la cerveza, el vino y el pan. Además de encontrar



hongos macromicetos de gran importancia como el género *Morchella*, *Hervella*, entre otros. Todos los ascomicetos presentan estructuras de reproducción muy características llamadas ascas que contienen ocho ascosporas dentro (Figura 6). A medida que se avanza en las distintas categorías de clasificación, los ascomicetos comienzan a formar el apotecio en los grupos más derivados.



Figura 6. Vista general de *Sclerotinia* sp. un representante típico de Ascomycota. Vista general del ascocarpo (apotesio), ascas con 8 ascosporas.

(Kaya & Uzun, 2018)

**Filo Basidiomycota:** Este filo se considera el más importante de todo el reino, es el segundo taxon más numeroso en especies solo después de Ascomycota. Este filo actualmente considera más de 30 000 especies distribuidos en 1589 géneros que se distribuyen en 241 familias, 68 órdenes, 18 clases y cuatro subfilos. En la actualidad se cuentan con notas breves para cada género, incluyendo información sobre clasificación, número de especies aceptadas, especies tipo, modo de vida, hábitat, distribución e información de secuencia. Caracterizadas por basidia como



meiosporocistos en el ciclo de la vida sexual. La cariogamia y la meiosis proceden en los basidios y se producen basidiosporas. Las hifas septadas mononucleados, binucleados o multinucleados, que tienen una pared multicapa o visualmente de una sola capa (He et al., 2019).



Figura 7. Diversidad de Basidiomas de Basidiomycota.

(Badalyan & Rapior, 2021)



## **IMPORTANCIA DE LOS HONGOS**

Los hongos son organismos presentes en todo el planeta son parte de la red trófica, como descomponedores de material orgánico muerto, como simbiotes mutualistas de plantas (micorrizas), como líquenes, parásitos y endófitos. Para cada grupo ecológico, existen hongos que están presentes y forman parte del funcionamiento del sistema. Evidentemente, los hongos son indispensables para los ciclos de nutrientes, para el crecimiento de las plantas y el equilibrio ecológico (Piepenbring et al., 2016).

## **IMPORTANCIA ECOLÓGICA**

Los hongos saprobios son los más diversos de la naturaleza, y forman parte del ciclo de reciclaje de nutrientes en los ecosistemas, las enzimas que producen son los encargados de degradar los residuos vivos e incorporarlos al ciclo de nutrientes. Los procesos de descomposición están íntimamente relacionados para derivar en el aprovechamiento de los nutrientes del suelo los cuales son absorbidos por las raíces de las plantas y aprovechados para completar su nutrición así como favorecer su crecimiento y desarrollo. Así mismo, gracias a este proceso los ecosistemas reciclan componentes de los desechos orgánicos, de otra forma se acumularían y se convertirían en montículos de materia orgánica no aprovechable (Heredia-Abarca, 2020). La asociación simbiótica mutualista de los hongos representa una estrategia clave en el éxito de muchos grupos de hongos, realizando los más destacados como asociación con plantas, formando micorrizas o con cianobacterias u algas formando líquenes. A lo largo de su evolución, las plantas han comprendido la necesidad de asociarse con organismos especializados como los hongos para facilitar su adaptación a diversos nichos ecológicos y asegurar un crecimiento y desarrollo óptimos. Si bien se conocen con certeza las funciones beneficiosas de algunos grupos de hongos para las plantas, hay otros cuyas interacciones permanecen inexploradas. Es emocionante pensar en el potencial que yace en estos hongos poco conocidos, tal vez incluso en aquellos actualmente considerados insignificantes, pues algunos podrían ser claves para que las plantas prosperen en condiciones adversas



o poseer propiedades únicas que revolucionen nuestra comprensión de la biología vegetal.

Cada nuevo descubrimiento en este vasto y fascinante reino fúngico nos recuerda humildemente cuánto hay por aprender y cuántas maravillas aguardan a ser exploradas en la intrincada trama de la vida en nuestro planeta (Heredia-Acuña et al., 2014). Otros hongos son capaces de atacar organismos vivos, plantas, animales u otros hongos, por lo que se consideran parásitos. Estos se aprovechan de nutrientes de otros organismos causando daños o enfermedad a sus hospederos. Uno de los ejemplos más conocidos es *Ustilago maydis* o vulgarmente conocido como Huitlacoche o Cuitlacoche, que representa una plaga importante a nivel mundial por las pérdidas y mermas en la producción de maíz, aunque en México es considerado como un alimento preciado desde tiempos prehispánicos (Piepenbring et al., 2016; Zúñiga-Castro & Quirós-Cedeño, 2021).

### **IMPORTANCIA CULTURAL**

México como país megadiverso y en diversidad fúngica no es la excepción, además del gran conocimiento biocultural. Esta condición ha posicionado a México como un importante pionero en el desarrollo de la etnomicología a nivel mundial. Riqueza que se resume con el uso de más de 370 especies reconocidas como comestibles y más de 160 utilizadas en la medicina tradicional de los grupos originarios de regiones de nuestro país. Dado esto la etnomicología como rama de micología se considera como el conocimiento relacionado con la utilización de los hongos por el ser humano, en sus diferentes expresiones, como la manifestaciones culturales, nomenclatura, clasificación, aspectos ecológicos, fenológicos, usos y toda forma de aprovechamiento (López-García et al., 2020).

### **HONGOS COMO RECURSOS GENÉTICOS**

En la actualidad existen alrededor de mil setecientos cincuenta bancos de germoplasma de recursos vegetales en el mundo, estos con poco más de siete millones de accesiones que conservan casi seis mil especies. Sin embargo, existen



indicios que alrededor de tres mil corresponden a tan solo cien especies. Para el caso de conservación de germoplasma de animales existen más de tres mil bancos de germoplasma en los que se conserva material genético en forma de embriones, semen en condiciones criogénicas, animales vivos mantenidos en áreas exclusivas. Irónicamente con la gran diversidad de especies de vertebrados e invertebrados existentes solo cerca de cuarenta especies conservados por estos métodos. Para el caso de microorganismos se reportan más de tres mil colecciones en las que se incluyen unas doce mil especies, 44 solo el 44% corresponde a especies de hongos, 43% de bacterias, 2% de virus y el resto de las algas, líquenes y protozoarios. Adicionalmente se encuentran algunas colecciones de muestras de ADN, plastidios y otros organismos utilizados en ingeniería genética. Las colecciones *ex situ* son muy caras e ineficaces. Estrategias complementarias de conservación *ex situ* e *in situ* pueden potenciar la capacidad de aprovechamiento futuro de los recursos genéticos (Casas, 2016).

## **HONGOS EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS**

### **Hongos silvestres**

Los hongos comestibles silvestres al par de otros recursos forestales no maderables forman parte de un componente relevante de la alimentación e ingreso económico de un innumerable número de familias a lo largo de todo el mundo, dado esto cobra una relevancia en el estudio del medio rural, en México la recolección de estos hongos es catalogada como una de varias actividades de aprovechamiento de recursos naturales, como lo son la siembra de diversos cultivos, cría de animales, cacería ocasional y la misma renta de la fuerza de trabajo; todas estas conforman una estrategia de subsistencia de los productores rurales que habitan las zonas forestales de México. Dichas actividades y de interacción con el medio constituyen una relación integrada por componentes ecológicos, sociales, culturales y económicos, que poseen dinámicas, función e interrelaciones que constituyen un agroecosistema originado de un proceso histórico, cultural y natural (Alvarado-Castillo et al., 2015).



## Hongos cultivados

### *Valor económico de la producción de hongos*

En la década de los 2010 la producción mundial de hongos cultivados está por encima de los 6.2 millones de toneladas, alcanzando valores monetarios cercanos a los 30 billones de dólares. Para esta década se estimó que la tasa de producción tuvo un incremento promedio del 11 %, basado principalmente en el avance en investigación y difusión de sus propiedades funcionales. Dado esta razón se prevé un alza considerable en la demanda de hongos comestibles, así como sus derivados. Para el 2015 en América Latina se estima una producción de hongos comestibles en fresco cercana a las 65 606.78 ton·año<sup>-1</sup>, mientras que México representa el 59 % de esa producción con 38 708 ton·año<sup>-1</sup>, posicionando a nuestro país como el dieciochoavo en producción mundial de hongos comestibles. En el tenor económico su exportación representa más de cuatro millones de dólares anuales. Todas las operaciones comerciales circundantes a la producción de hongos comestibles representan montos anuales aproximados a los 150 millones de dólares. La producción de hongos tiene gran importancia ecológica ya que se estima una utilización y reciclaje de más de 386 000 toneladas anuales de subproductos de la agricultura, residuos agroindustriales y residuos forestales. Los principales hongos cultivados en la actualidad a nivel mundial es el champiñón (*Agaricus bisporus*), las setas (complejo: *Pleurotus* spp.), el shitake (*Lentinula edodes*) y seta de paja de arroz (*Volvariella volvacea*)(Cano-Estrada & Romero-Bautista, 2016).

### *Parámetros productivos*

El éxito del cultivo a escala industrial depende del conocimiento preciso de los parámetros que determinan su productividad. Se mencionan los principales parámetros productivos de las especies de *Pleurotus*, como velocidad de crecimiento, eficiencia biológica, tasas de producción y rendimiento. El análisis de estos parámetros permite optimizar los procesos de cultivo y maximizar la productividad de este hongo comestible.



- Velocidad radial de crecimiento micelial: 5-7 mm/día en promedio para algunas cepas (C. Sánchez, 2010).
- Eficiencia biológica: 90-120% en la mayoría de las especies de *Pleurotus*, siendo muy eficientes en la conversión del sustrato (Mshandete & Cuff, 2008).
- Tasa de producción: alrededor de 10-15% del peso fresco del sustrato (Gaitán-Hernandez et al., 2006).
- Rendimiento: varía entre 15-25% respecto al sustrato seco, dependiendo de la especie y condiciones. *P. ostreatus* presenta rendimientos de hasta 35% (Philippoussis et al., 2001).
- Número de cosechas: de 3 a 5 cosechas en un mismo sustrato (C. Sánchez, 2010).
- Período de incubación: 15-25 días desde siembra hasta primera cosecha (Gaitán-Hernandez et al., 2006).
- Ciclo productivo: 2-4 meses entre siembra y agotamiento del sustrato (Mshandete & Cuff, 2008).
- Producción: 100-150 kg de hongos frescos por cada 100 kg de sustrato seco (Gaitán-Hernandez et al., 2006).

### ***Valor biológico y contenido nutrimental***

Los hongos comestibles tienen un alto valor biológico debido a su composición nutricional, la cual es comparable a la de otros alimentos de origen vegetal y animal (Györfi, 2010). Contienen cantidades significativas de proteínas, que representan en promedio entre un 20-40% de su materia seca, con valores biológicos equiparables a los de las proteínas de los cereales y legumbres (Beluhan & Ranogajec, 2011). Asimismo, los hongos poseen todos los aminoácidos esenciales en proporciones adecuadas. Por ejemplo, las especies *Agaricus bisporus* y *Pleurotus ostreatus* tienen concentraciones de lisina mayores que las leguminosas, lo que complementa aminoácidos deficitarios en dietas basadas en cereales (Cohen et al., 2002).



Otros nutrientes presentes en cantidades relevantes son fibra dietética, vitaminas como riboflavina, niacina y ácido ascórbico, y minerales como fósforo, potasio, magnesio, sodio y hierro (Mattila et al., 2001). Los compuestos bioactivos en hongos, como polisacáridos y terpenoides, tienen propiedades antioxidantes, antimicrobianas e inmunomoduladoras (Lakhanpal & Rana, 2005).

### ***Hongos como alimentos funcionales***

Los alimentos funcionales son aquellos productos alimenticios, naturales o procesados, que además de sus componentes nutritivos contienen compuestos adicionales que favorecen la salud, la capacidad física y el estado mental del ser humano. El distintivo de "alimento funcional" se relaciona con el concepto bromatológico de "propiedad funcional", refiriéndose a las características únicas que posee un alimento en virtud de su composición química y las interacciones fisicoquímicas en su entorno, sin necesariamente estar vinculadas a su valor nutricional intrínseco. Estos alimentos trascienden la mera función de nutrir al ofrecer beneficios excepcionales que promueven el bienestar integral, convirtiéndolos en aliados valiosos para una vida más saludable. Otro concepto de alimento funcional es aquel que ha demostrado afectar benéficamente una o más funciones específicas en el cuerpo, resultando en el estado de bienestar y salud o la reducción de riesgo de una enfermedad (Cano-Estrada & Romero-Bautista, 2016; Rojas et al., 2012).

### ***Enzimas fúngicas en la degradación de fibras***

Las enzimas fúngicas juegan un papel importante en la degradación de diversos tipos de fibras vegetales, actuando específicamente sobre los componentes complejos de la pared celular como celulosa, hemicelulosa y lignina (Brijwani et al., 2010). Se ha demostrado que hongos filamentosos como *Aspergillus* y *Trichoderma* secretan un amplio rango de enzimas hidrolíticas extracelulares, incluyendo celulasas, hemicelulasas y ligninasas. Estas enzimas actúan sinérgicamente para depolimerizar las fibras vegetales, permitiendo el aprovechamiento de materiales fibrosos en diversas aplicaciones biotecnológicas e industriales (Singhanía et al.,



2010). El uso de preparados enzimáticos fúngicos representa una alternativa ecológica y eficiente para el pretratamiento de materiales lignocelulósicos, mejorando procesos como la producción de biocombustibles, pulpa y papel, textiles, alimentos y piensos animales.

## **PRODUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO**

La evidencia sobre el calentamiento global es inequívoca. Una de las principales causas de ese fenómeno es el aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y ozono ( $\text{O}_3$ ) producidos por las actividades humanas. El cambio climático se manifiesta fundamentalmente por el aumento de la temperatura media mundial, la modificación de los patrones de precipitación etc. Estas transformaciones tienen un fuerte impacto en las actividades económicas, el bienestar social y los ecosistemas (Bárcena et al., 2020).

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  son más relevantes en los sectores de energía y de los procesos industriales las cuales son consideradas, las mayores emisoras globales, y la mayor parte proviene del uso de recursos no renovables derivados de combustibles fósiles. En la agricultura y la producción de alimentos, se generan diversos gases con un alto potencial de calentamiento, tales como el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Todos los gases de efecto invernadero tienen moléculas con 2 o más átomos que se mantienen unidas con suficiente espacio entre sí para poder vibrar cuando absorben calor, eventualmente la molécula que vibra libera radiación y esta será posiblemente absorbida por otra molécula. A este proceso mediante el calor se mantiene sobre la superficie terrestre se conoce como efecto invernadero.

De estos GEI el potencial de calentamiento global del  $\text{CH}_4$  es de 21 a 25 veces el del  $\text{CO}_2$  y se emite principalmente por fermentación entérica y la fermentación de excretas (Sánchez et al., 2018).

### **Los rumiantes y los gases de efecto invernadero**

Los rumiantes son una fuente de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, participan con el 26% del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )(FAO, 2022), el 18 %



del metano ( $\text{CH}_4$ ) del total producido en el mundo, considerados como los gases de efecto invernadero (GEI) que acelera el cambio climático (Ramírez-Bribiesca, 2018). Estos animales emiten  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, principalmente a partir de la fermentación de carbohidratos solubles y estructurales.

La concentración de estos gases es cada vez mayor en la atmósfera (P. Sánchez-Santillán et al., 2018). Por ello, se han desarrollado diversas estrategias para la mitigación de GEI, entre ellas la alimentación dentro de las más eficientes por la modificación de las poblaciones microbianas del rumen (Knapp et al., 2014).

A pesar que el metano se encuentra en menor concentración con respecto al  $\text{CO}_2$ , esto muestra claramente la relevancia del metano en la atmósfera ya que su capacidad de producir efecto invernadero es de 21 a 30 veces mayor que el dióxido de carbono.

### **Ambiente Ruminal**

Los bovinos cuentan con un sistema digestivo que puede transformar eficientemente materiales fibrosos ricos en carbohidratos estructurales en alimentos altamente nutritivos como la carne y la leche. No obstante, debido a sus características naturales, este mismo sistema digestivo también genera metano, uno de los gases de efecto invernadero (Carmona et al., 2005).

La fermentación en el rumen se logra por una amplia gama de microorganismos que son esenciales para llevar a cabo todos los procesos de fermentación de los alimentos. El rumen depende de que estos microorganismos actúen directamente sobre los alimentos, descomponiéndolos y proporcionando los nutrientes necesarios para el animal (Relling & Mattioli, 2003).

### **Productos de la fermentación**

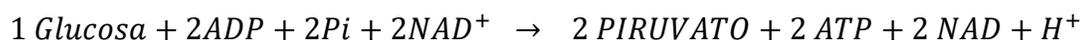
Martin et al., (2019) señalan que la fermentación es un proceso sin oxígeno que lleva a cabo la población de microorganismos presentes en el rumen durante el metabolismo de los carbohidratos que consumen los rumiantes. Estos microorganismos metabolizan los carbohidratos estructurales mediante un proceso anaeróbico, convirtiéndolos en ácidos grasos de cadena corta (AGCC), los cuales



incluyen ácido acético, propiónico y butírico. En el proceso fermentativo también son producidos gases donde aproximadamente el dióxido de carbono CO<sub>2</sub> que representa aproximadamente el 60% aproximadamente de la producción y metano CH<sub>4</sub> representado entre 30 a 40% esto dependiendo de la concentración y proporciones relativas de los ácidos grasos producidos. Por otro lado, cantidades variables de H<sub>2</sub> se originan de las reacciones de descarboxilación durante la fermentación y de las reacciones de neutralización de H<sup>+</sup> por el CO<sub>3</sub><sup>-</sup> proveniente de la saliva o secretado por el epitelio ruminal durante la absorción de los AGCC. El CH<sub>4</sub> es originado como producto de la reducción del CO<sub>2</sub> y formado por las Arqueas metanogénicas.

### **Producción y destino metabólico del H<sub>2</sub>**

La fermentación ruminal de carbohidratos estructurales y de los almidones genera hexosas, que para su fermentación siguen la ruta de glucólisis, la cual presenta el siguiente balance neto (Rodwel, 2016).



El piruvato generado en la glucólisis se transforma en ácidos grasos de cadena corta, principalmente acetato, propionato y butirato, mediante diversas vías metabólicas. El acetil-CoA, derivado del piruvato a través de reacciones fosforoclasticas, se metaboliza en acetato a través de acetil-fosfato, o en butirato a través de acetoacetyl-CoA. La producción total de NAD en su forma reducida (NADH+H<sup>+</sup>), H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> por molécula de glucosa fermentada hacia acetato o butirato es 2NADH + 2H<sup>+</sup>, durante la glucólisis, y 2H<sub>2</sub> + 2CO<sub>2</sub>, durante la descarboxilación del piruvato, reacción catalizada por la enzima piruvato ferredoxina oxidorreductasa (Fd) acoplada a una hidrogenasa.

En este balance, una molécula NADH+H<sup>+</sup> se oxida durante la reducción del acetoacetyl-CoA a butirato. Especies del género *Propionibacterium*, *Clostridium propionicum* y *Megasphaera elsdenii* fermentan glucosa o lactato a propionato, acetato y CO<sub>2</sub> (3 glucosa → 4 propionato + 2 acetato + 2 CO<sub>2</sub>; 3 lactato → 2 propionato + acetato + CO<sub>2</sub>), reacciones que se dan a través de la rutas del acrilato o



del succinato-propionato, las cuales no producen  $H_2$ , sino que, por el contrario, los consume (Kim & Gadd, 2008).

### **Metanogénesis ruminal**

El  $CH_4$  producido por bovinos se origina especialmente de la fermentación entérica (85 a 90 %) siendo el resto producido a partir de las heces de estos animales. Del total de  $CH_4$  producido por los rumiantes en el proceso de fermentación entérica en rumen: 95 % es excretado por eructación y producido en el tracto digestivo posterior; 89 % es excretado a través de la respiración y tan solo 11 % por el ano (Martin et al., 2019). Bonilla & Lemus (2012) mencionan que, en la fermentación ruminal, los factores nutricionales que influyen en la cantidad de gas metano ( $CH_4$ ) producido incluyen la calidad del alimento, su composición, digestibilidad, tratamiento previo y la cantidad de alimento consumido. La estacionalidad de la producción de forrajes afecta la calidad, así en la temporada seca en la que predominan los gramíneas tipo C4 que tienen un valor nutricional inferior en comparación con los pastos C3.

En el rumen, los principales sustratos para la producción de metano son el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), los compuestos que contienen grupos metilo y el acetato. Los microorganismos metanógenos del rumen utilizan principalmente hidrógeno ( $H_2$ ) para reducir el  $CO_2$  a metano ( $CH_4$ ) en un conjunto de reacciones que están vinculadas a la síntesis de ATP. En este proceso, el  $CO_2$  actúa como fuente de carbono y el  $H_2$  como el principal donador de electrones. Además, el formato también desempeña un papel importante como donador de electrones y puede contribuir hasta un 18% a la producción total de metano en el rumen. Aunque las metilaminas y el metanol pueden ser utilizados por los órdenes Metanosarcinal y Metanobacterial para la producción de  $CH_4$ , su contribución total a la metanogénesis es mínima. También es posible la producción de  $CH_4$  a partir del acetato mediante la vía acetoclástica, pero esta ruta metabólica solo es utilizada por miembros del orden Metanosarcinal. Además, dado que el acetato es rápidamente absorbido y utilizado por el rumiante, su contribución a la producción total de metano es insignificante (Quintanilla-Medina et al., 2020).



## Arqueas Metanogénicas

Para que el CH<sub>4</sub> se produzca en el rumen existe un grupo altamente especializado de microorganismos anaerobios estrictos que requieren condiciones libres de oxígeno y potencial redox (< 330 mM) que en su mayoría tienen tiempos de duplicación prolongados desde horas hasta varios días. El metabolismo de las arqueas metanogénicas es muy específico y utilizan la energía en la producción de CH<sub>4</sub> por medio del uso de diferentes sustratos como el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> es usado como su aceptor terminal de electrones en la respiración anaeróbica convirtiéndolo a CH<sub>4</sub> y utilizando H<sub>2</sub> como donador de electrones. Las condiciones anaerobias, la ausencia de luz y la presencia de NO<sub>3</sub>, S y SO<sub>4</sub> que caracterizan la fermentación de materia orgánica conducen a la biogénesis de CH<sub>4</sub> (Sosa et al., 2007).

El metano es un oriducto de los microorganismos pertenecientes al dominio arqueas que comprende dos reinos: *Euryarchaeaota* (metanogénicos, halófilos extremos y algunos hipertermófilos) y *Crenarchaeota*. Algunas de las especies que han sido clasificadas son: *Methanobacterium formicicum*, *M. bryantii*, *M. thermoautotrophicum*, *Methanobrevibacter ruminantium*, *M. arboriphilus*, *M. smithii*, *Methanococcus vannielii*, *M. voltae*, *Methanomicrobium mobile*, *Methanogenium cariaci*, *M. marisnigri*, *Methanospirillum hungatei* y *Methanosarcina barkeri*. Estos microorganismos son muy diversos con estructuras morfológicas diferentes siendo únicos porque pueden usar sustancias simples para obtener energía y crecer; así como su habilidad para producir CH<sub>4</sub>. Estos metabolizan un número limitado de sustratos convierten los carbohidratos, proteínas y lípidos en fragmentos de menor peso molecular. Dichos sustratos pueden ser utilizados por bacterias acetógenicas (productoras de H) para formar acetato, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y posteriormente estas moléculas son utilizadas por bacterias metanogénicas que promueven una adecuada y eficiente remoción del H<sub>2</sub>. Los microorganismos metanogénicos ruminales requieren un pH estable para una óptima fermentación, pero este proceso metabólico considera una pérdida energética alta para el animal que puede llegar a ser potencialmente utilizable por este (Bonilla & Lemus, 2012)



## ANTECEDENTES

---

### EL GÉNERO *Pleurotus*

La clasificación taxonómica del género *Pleurotus* indica la pertenencia al Reino:Fungi, Phylum:Basidiomycota, Clase:Agaricomycetes, Orden:Agaricales y Familia:Pleurotaceae (Asociación Micológica Internacional & Instituto de Biodiversidad Fúngica de Westerdijk, 2005; Kirk et al., 2008)

Comprende hongos saprobios que se desarrollan formando cuerpos fructíferos carnosos, con forma de concha, roseta o abanico. Presentan láminas himeniformes, con bordes enteros y generalmente decurrentes sobre el pie. El sombrero o píleo es convexo a plano o deprimido. El estipe o pie es lateral o excéntrico, a veces casi ausente (Jayachandran et al., 2017)

El género *Pleurotus* conocido vulgarmente como seta u hongo ostra posee registros de consumo que se remontan a la antigüedad en Asia, específicamente China y Japón, donde se tiene evidencia del aprovechamiento culinario de varias especies silvestres (Chang & Wasser, 2012) En países europeos hay reportes de recolección y consumo de *Pleurotus* desde el siglo XVIII, mientras que su cultivo controlado se estableció a inicios del siglo XX (Kues & Liu, 2000). El primer reporte del cultivo de especies del *Pleurotus* data de 1917 en Alemania, usando métodos estandarizados (Royse et al., 2017). Para la década de 1950 su producción ya alcanzaba escala comercial en varios países de Europa (Sánchez, 2010). Posteriormente se introdujo y acoplo su cultivo en Norteamérica y otras regiones. En la actualidad, *Pleurotus ostreatus* y otras especies son unos de los hongos comestibles cultivados más importantes a nivel mundial (Santos et al., 2015).

La investigación científica sobre este género fúngico se intensificó desde 1970, abordando aspectos taxonómicos, fisiológicos y las condiciones óptimas de cultivo (Cohen et al., 2002). En las últimas décadas se siguen describiendo nuevas especies de este prolífico género, valioso recursos alimentario y biotecnológico.



### **Especies de interés del género *Pleurotus***

*Pleurotus ostreatus* es la especie del género que más ha sido estudiada y aplicada industrialmente. Se cultiva en más de 50 países por su versatilidad, rápido crecimiento y facilidad de propagación (Cohen et al., 2002). Otras especies reconocidas son *P. eryngii*, *P. pulmonarius*, *P. cornucopiae*, *P. citrinopileatus* y *P. dejamur*.

*P. eryngii* posee alto valor culinario y se cultiva comercialmente en Europa y Norteamérica (Andrino et al., 2011). *P. pulmonarius* sobresale por su capacidad ligninolítica para degradar residuos agrícolas (Isikhuemhen & Mikiashvilli, 2009). *P. cornucopiae* produce compuestos bioactivos como lovastatina y polisacáridos antitumorales (Llaurado et al., 2018). *P. citrinopileatus* es eficiente biorremediador de suelos contaminados y biosorbente de metales pesados (Crespo, 2021). En conjunto, las especies de *Pleurotus* representan recursos fúngicos versátiles para la alimentación, la farmacéutica y aplicaciones medioambientales. *P. djamor* se adapta a climas tropicales y es una especie promisorio para cultivo a partir de residuos agroindustriales (Ragunathan & Swaminathan, 2003). En conjunto, las especies de *Pleurotus* representan recursos fúngicos versátiles para diversas aplicaciones.

### ***Pleurotus agaves* Dennis**

Este hongo es un basidiomiceto sapróbio que crece sobre plantas de agave (*Agave* spp.) muertos o próximos al final de su ciclo de vida (Sánchez-Vázquez et al., 2007). Presenta un píleo en forma de embudo o roseta, de 5-15 cm de diámetro, inicialmente convexo y luego plano o deprimido. La superficie es lisa, de color crema a café grisáceo. Las láminas son decurrentes, de color blanquecino a crema. El estipe es excéntrico o lateral, corto, fibroso, de color blanco a marrón grisáceo (Huerta et al., 2009). El micelio es incoloro, formado por hifas septadas. Produce basidios claviformes tetraspóricos y basidiosporas elípticas a cilíndricas, lisas, hialinas, no amiloides, de 5-7 x 2-3  $\mu\text{m}$ . (Camacho et al., 2012).



### ***Pleurotus ostreatus* (Jack. ex Fr) Kumm.**

*Pleurotus ostreatus*, conocido comúnmente en México como hongo seta, es un hongo basidiomiceto de la familia Pleurotaceae. Es ampliamente cultivado y consumido debido a su valor nutricional y propiedades medicinales. Según (Royse & Sánchez-Vázquez, 2017), este hongo se caracteriza por tener un sombrero convexo a aplanado, de color blanco a gris pálido, que se torna ocre o marrón al envejecer. El sombrero mide de 5 a 25 cm de diámetro y presenta laminillas decurrentes de color blanco a crema. El pie o tallo es corto, lateral y excéntrico, de color blanco.

Este hongo tiene una gran capacidad de degradar una amplia gama de sustratos lignocelulósicos, como residuos agrícolas y forestales, lo que lo convierte en una opción sostenible y amigable con el medio ambiente (Royse et al., 2017). Además, es una excelente fuente de proteínas, fibra, vitaminas y minerales (Kalač, 2013).

Algunos estudios han demostrado que *P. ostreatus* posee propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas y anticancerígenas, gracias a su composición rica en compuestos bioactivos como polisacáridos, proteínas, terpenos y compuestos fenólicos (Ayala et al., 2016; Beltrán et al., 2021; Ramírez, 2009).

### ***Pleurotus djamor* (Fr.) Boedjin.**

Este hongo es comúnmente conocido como seta rosada, es una especie de hongo comestible perteneciente al género *Pleurotus*. Esta especie de seta es ampliamente cultivada y valorada por sus características organolépticas y nutricionales (Sánchez-Vázquez et al., 2007).

Según Royse & Sánchez-Vázquez (2017), *P. djamor* se caracteriza por tener un píleo de forma convexa a plana, de color rosado a rojizo cuando es joven, tornándose más pálido o blanquecino a medida que envejece. El diámetro del sombrero puede alcanzar hasta 20 cm. Las laminillas son decurrentes y de color blanco cremoso. El estípite es lateral, corto y delgado, de color blanquecino.



Es un hongo como una importante fuente rica en proteínas, fibra, vitaminas y minerales, lo que lo convierte en un alimento nutritivo y saludable (Sánchez, 2010). Además, numerosos estudios han demostrado que este hongo posee propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, inmunomoduladoras y anticancerígenas, gracias a su composición en compuestos bioactivos como polisacáridos, proteínas y compuestos fenólicos (Beltrán et al., 2021; Huaping et al., 2019).

El cultivo es relativamente sencillo y puede realizarse a partir de una variedad de sustratos lignocelulósicos, lo que lo convierte en una opción sostenible y económica para la producción de alimentos y la obtención de compuestos bioactivos (Royse & Sánchez-Vázquez, 2017).

## **APROVECHAMIENTO BIOTECNOLÓGICO DE *Pleurotus***

### **Usos industriales de *Pleurotus*.**

Producción de enzimas: son capaces de producir enzimas de interés industrial, como lacasas, lignino-peroxidasas y manganeso-peroxidasas, que se utilizan en diversos procesos biotecnológicos, como el blanqueo de la pulpa de papel, la decoloración de tintes y la degradación de compuestos xenobióticos (Ozcirak & Ozturk, 2017).

Biorremediación y tratamiento de aguas residuales: debido a su capacidad para degradar una amplia gama de compuestos orgánicos, los hongos *Pleurotus* se han utilizado en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, pesticidas y colorantes, así como en el tratamiento de aguas residuales industriales (Pozdnyakova et al., 2006).

Producción de biocombustibles: los residuos agrícolas y forestales, como la paja de trigo y los residuos de la industria maderera, pueden ser utilizados como sustratos para el cultivo de *Pleurotus* y la posterior producción de bioetanol y otros biocombustibles (Prasad et al., 2022).



## **Cinética de crecimiento y producción de biomasa**

La cinética de crecimiento y producción de biomasa de los hongos del género *Pleurotus* ha sido ampliamente estudiada en los últimos años debido a su importancia en la industria alimentaria y farmacéutica.

Los hongos comúnmente conocidos como setas, son capaces de crecer en una amplia variedad de sustratos lignocelulósicos, lo que los convierte en una opción atractiva para el aprovechamiento de residuos agroindustriales (C. Sánchez, 2010). Su cinética de crecimiento sigue un patrón típico de curva sigmoidea, con una fase lag inicial, seguida de una fase exponencial y finalmente una fase estacionaria (Papaspýridi et al., 2010).

Factores como la composición del sustrato, la temperatura, la humedad y la aireación juegan un papel crucial en la cinética de crecimiento y la producción de biomasa de estos hongos. Se ha demostrado que sustratos ricos en lignina y celulosa, como los residuos agrícolas y forestales, son ideales para su cultivo (C. Sánchez, 2010). La temperatura óptima para el crecimiento de *Pleurotus* oscila entre 25 y 30°C, mientras que la humedad relativa óptima se encuentra en el rango de 60-70% (Gaitán-Hernandez et al., 2006).

Además, la producción de biomasa y la cinética de crecimiento pueden verse afectadas por la presencia de compuestos inhibidores o estimulantes en el sustrato. Por ejemplo, se ha reportado que la presencia de compuestos fenólicos puede inhibir el crecimiento de *Pleurotus*, mientras que la adición de fuentes de nitrógeno orgánico puede estimular su crecimiento y producción de biomasa (Papaspýridi et al., 2010; C. Sánchez, 2010).

En resumen, la cinética de crecimiento y producción de biomasa de los hongos del género *Pleurotus* depende de una combinación de factores ambientales y nutricionales, y su optimización es crucial para maximizar el rendimiento y la eficiencia de su cultivo.



### **Metabolitos secundarios en *Pleurotus***

Los hongos del género *Pleurotus* son ampliamente cultivados no solo por su valor nutricional, sino también por su capacidad de producir una gran variedad de metabolitos con propiedades bioactivas y aplicaciones en diferentes campos.

Los metabolitos producidos por *Pleurotus* pueden ser clasificados en metabolitos primarios y metabolitos secundarios. Los metabolitos primarios, como proteínas, polisacáridos y lípidos, son esenciales para el crecimiento y el desarrollo del hongo (Erjavec et al., 2012). Por otro lado, los metabolitos secundarios son compuestos bioactivos que no son esenciales para el crecimiento, pero desempeñan funciones importantes en la interacción del hongo con su entorno (Conrado et al., 2022).

Uno de los metabolitos secundarios más importantes producidos por los hongos *Pleurotus* son los compuestos fenólicos, como los ácidos fenólicos y los flavonoides. Estos compuestos han demostrado tener propiedades antioxidantes, anticancerígenas y antimicrobianas (Palacios et al., 2011). Otro grupo de metabolitos relevantes son los polisacáridos, como los  $\beta$ -glucanos y las quitinas, que han demostrado propiedades inmunomoduladoras y antitumorales (Giavasis, 2014).

Los hongos *Pleurotus* también son una fuente importante de compuestos volátiles, como alcoholes, cetonas y ésteres, que contribuyen al aroma y al sabor de los hongos frescos y procesados (Del Moral-Hernández et al., 2021). Además, se han identificado compuestos bioactivos como terpenoides, esteroides y ácidos grasos con actividades antiinflamatorias, antidiabéticas y anticancerígenas (Barros et al., 2007).

La obtención de estos metabolitos se realiza mediante técnicas de extracción y purificación a partir de los cuerpos fructíferos o del micelio de los hongos *Pleurotus*. Los métodos de extracción más comunes incluyen la extracción con solventes, la extracción asistida por microondas, la extracción asistida por ultrasonido y la extracción con fluidos supercríticos (Heleno, Martins, et al., 2015).



## **Producción de hongos como alimentos funcionales**

El cultivo de hongos funcionales se lleva a cabo utilizando diversas técnicas, como el cultivo en troncos, en bolsas con sustratos especiales o en fermentadores líquidos. Tradicionalmente, los hongos comestibles se han cultivado en troncos de madera o en sustratos compuestos por materiales lignocelulósicos (D. J. Royse et al., 2017). Sin embargo, debido a los avances en la investigación, se han desarrollado otros métodos de producción más eficientes y controlados.

Para aumentar la producción de compuestos bioactivos, que son los que aportan beneficios para la salud, se pueden manipular las condiciones de cultivo, ajustando factores como el pH, la temperatura y la fuente de nutrientes utilizada. Una técnica prometedora en este sentido es la fermentación en estado sólido, la cual, como mencionan Heleno, et al., (2015), ha demostrado ser una técnica prometedora para mejorar la producción de compuestos bioactivos en hongos comestibles

## **Procesamiento y estabilidad**

Después del cultivo, los hongos funcionales pueden someterse a diversos procesos para mantener la estabilidad y biodisponibilidad de los compuestos bioactivos. Estas técnicas de procesamiento, como el secado, la extracción y la encapsulación, son fundamentales para preservar la actividad biológica de los compuestos bioactivos presentes en los hongos (Crespo, 2021).

## **Regulaciones y seguridad alimentaria**

Es fundamental cumplir con las regulaciones y normativas vigentes en cada país o región para la producción, el etiquetado y la comercialización de alimentos funcionales a base de hongos. Además, se deben realizar evaluaciones de seguridad y toxicidad de los compuestos bioactivos presentes en estos productos (Balcerzak et al., 2019).



## Usos en biorremediación y biocombustibles

### ***Biorremediación***

*Pleurotus* ha demostrado un gran potencial en la biorremediación debido a su capacidad para degradar una amplia variedad de compuestos contaminantes, incluyendo hidrocarburos, colorantes, plaguicidas y metales pesados. Para la degradación de hidrocarburos *Pleurotus ostreatus* ha sido ampliamente estudiado por su capacidad para degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y otros compuestos orgánicos persistentes en suelos contaminados (Herrera & Ocorima, 2021).

Los hongos de la pudrición blanca, como *Pleurotus*, han sido empleados en la decoloración y degradación de colorantes sintéticos presentes en efluentes industriales debido a su sistema enzimático extracelular (Cano et al., 2021).

En la remoción de metales pesados *Pleurotus ostreatus* ha demostrado ser eficiente en la biorremediación por la remoción de elementos tóxicos como cadmio, plomo y cobre de suelos y aguas residuales contaminadas (Kulshreshtha et al., 2014).

### **Biocombustibles**

*Pleurotus* también ha sido explorado como una fuente potencial para la producción de biocombustibles debido a su capacidad para degradar material lignocelulósico. Producción de etanol: Los residuos agrícolas ricos en lignocelulosa, como la paja de trigo, pueden ser degradados por *Pleurotus* para la producción de etanol mediante hidrólisis enzimática y fermentación (Bharathiraja et al., 2014; Prasad et al., 2022).

### ***Pleurotus* en la alimentación animal**

#### ***Uso en el mejoramiento de forrajes***

Los hongos del género *Pleurotus* son una especies de hongos saprobios ampliamente estudiados por su capacidad para crecer en una amplia gama de sustratos agrícolas (Zięba et al., 2020). Su rápida tasa de crecimiento y habilidad



para degradar materiales lignocelulósicos lo hacen ideal para la mejora de forrajes.

Polimerizan materiales lignocelulósicos como la celulosa y la lignina, convirtiéndolos en productos más simples (Delfín-Alcalá & Durán-De-Bazúa, 2003). Esta capacidad de degradación es esencial para aumentar la digestibilidad y la disponibilidad de nutrientes en los forrajes.

Uso de hongos en la mejora de forrajes:

- Residuos Agrícolas: *Pleurotus* puede cultivarse en residuos agrícolas como paja y rastrojo de maíz para producir forrajes más digestibles (Peña, 2013).
- Complemento en la Alimentación Animal: la inclusión residuos de los hongos en la dieta del ganado puede mejorar la calidad nutricional del forraje (Gómez et al., 2013).
- Degradación de la fibra: la digestibilidad de los forrajes al degradar la fibra de las plantas, estas producen enzimas capaces de oxidan la lignina y la hemicelulosa, mejorando considerablemente la digestibilidad de los forrajes (Peláez et al., 2008).
- Enriquecimiento proteínico: Algunos hongos pueden ser utilizados para enriquecer el contenido proteínico de los forrajes. El *Saccharomyces cerevisiae* ha sido utilizado para mejorar el valor nutritivo de los forrajes al aumentar el contenido de proteína cruda y la digestibilidad *in vitro* (Suárez-Machín & Guevara-Rodríguez, 2017).
- Control de micotoxinas: Los hongos pueden ser utilizados como agentes de control biológico donde reducen la presencia de micotoxinas en los forrajes. Ciertas especies de *Trichoderma* tienen la capacidad de inhibir el crecimiento de hongos productores de micotoxinas, como *Aspergillus* y *Fusarium*, en los forrajes almacenados (Loi et al., 2023).
- Mejora de la fermentación: La adición de hongos puede mejorar el proceso de fermentación de los ensilajes, contribuyendo a una mejor conservación y calidad del forraje. La inoculación de ensilajes con hongos como *Aspergillus*



*oryzae* puede mejorar la fermentación y reducir las pérdidas de nutrientes (Brijwani et al., 2010).

- Producción de aditivos: Los extractos de *Pleurotus ostreatus* han sido investigados como aditivos alimentarios para mejorar la digestibilidad y el valor nutricional de los forrajes (Kalogeropoulos et al., 2013).

### **Producción de hongos comestibles.**

Los hongos comestibles son muy apreciados por sus propiedades nutricionales y medicinales (Valverde et al., 2015). Su producción ha aumentado en las últimas décadas impulsada por la demanda del mercado.

*Pleurotus* spp: es el segundo más producido después de *Agaricus bisporus* a nivel global. *P. ostreatus*, *P. cystidiosus* y *P. pulmonarius* son las principales especies cultivadas (De Silva et al., 2013).

*Lentinula edodes*: También llamado “shiitake”. Su producción mundial pasó de 2 billones de dólares en 2015 a 2.9 billones en 2021, liderada por China con un 92% (Li & Xu, 2022).

*Auricularia auricula-judae*: Conocido como “oreja de palo”. India es el mayor productor con el 18% del total mundial. Le siguen China, Vietnam, Nepal y Tailandia.

En México, el cultivo de setas y trufas alcanzó un valor de 47 millones de dólares en 2021, destacando Querétaro, Estado de México y Puebla. El shiitake y la oreja de palo también han ganado importante presencia en el mercado nacional (Sánchez & Royse, 2001).

La producción de alimentos requiere una serie de actividades que fortalezcan la generación de productos nutritivos, con aporte a la salud y que sean amigables con el ambiente.

En los últimos años, los hongos del género *Pleurotus* han experimentado un crecimiento sin precedentes en su producción mundial, superando las expectativas de expansión de muy pocos alimentos en períodos tan cortos. Esta notable



tendencia se ha concentrado principalmente en Asia, aunque también se ha tenido representación importante en países iberoamericanos como España, Brasil y México. El éxito de los *Pleurotus* radica en sus cualidades únicas y extraordinarias, cautivando los sentidos con exquisitos sabores, aromas y valor nutricional, además de aportar beneficios nutraceuticos y un enorme potencial biotecnológico en diversos campos. Esta combinación excepcional de atributos impulsa la creciente demanda y producción global, que continúan su imparable ascenso, siendo muy atractivo para más productores y consumidores cada día, quienes descubren los tesoros ocultos en estos fascinantes seres fúngicos (Royse & Sánchez, 2017).

Los hongos contienen un buen balance de aminoácidos esenciales para los seres humanos. Posee minerales como selenio, fósforo y potasio, al igual que vitaminas, entre otros. Estos hongos presentan propiedades que hacen de estos alimentos ideales, adicionalmente se mencionan propiedades antitumorales, reductores de colesterol, entre otras atribuciones alimentarias (Ayala et al., 2016; Llauro et al., 2018). También han sido apreciados por su característico sabor, bajo costo y propiedades medicinales (Cano-Estrada & Romero-Bautista, 2016). La producción de hongos es una opción viable y rentable ya que obtiene proteína de buena calidad a partir de compuestos lignocelulolíticos en contraste con la producción animal que puede producir alimentos proteínicos a partir de estos mismos compuestos en un periodo mucho más largo y con cantidades enormes de forraje (Nieto Juárez et al., 2021; Valencia de Ita et al., 2019).

En nuestro país, si bien contamos con conocimiento sobre las especies comerciales de *Pleurotus*, lamentablemente la escasez de recursos económicos y tecnológicos ha obstaculizado la investigación sobre el cultivo de hongos nativos mexicanos. Esta situación es particularmente notoria en lo que respecta al hongo que crece en las plantas de maguey, un hongo autóctono sobre el cual existen muy pocos estudios realizados. A pesar de la riqueza biológica de nuestro territorio y del potencial que representan estos hongos nativos, las limitaciones financieras y tecnológicas han frenado la exploración y el desarrollo de su cultivo.



Según (Barrales & Mata, 2016) en México no se han podido aprovechar plenamente estos recursos naturales debido a restricciones presupuestarias y de infraestructura.

Para *P. opuntiae* Portilla et al., (2019) reporta en diversas combinaciones de sustratos se reportan niveles de producción de  $59.22 \pm 0.27$  % de Eficiencia Biológica (EB) en comparación con *Pleurotus ostreatus* cepa CP-50 (del Colegio de Posgraduados) donde reporta  $141.29 \pm 0.96$  % de EB. En el caso de proteína cruda reporta datos muy variables dando un rango de  $28.89 \pm 0.54\%$  a  $37.78 \pm 0.36\%$  mientras que de fibra cruda reporta datos que van de  $8.35 \pm 0.00\%$  a  $14.53 \pm 0.39\%$ . siendo estos datos muy variables para la especie.



## OBJETIVOS

---

### GENERAL

- I. Determinar el potencial biotecnológico de *P. agaves* con el fin de obtener atributos en la producción de alimento, la mejora de la digestibilidad y la reducción del índice de calentamiento global del rastrojo de maíz mediante la cuantificación de los parámetros productivos y fermentación *in vitro* de la materia seca.

### Objetivos Específicos

- I. Describir la morfología colonial de *Pleurotus agaves*, mediante observación macroscópica en el desarrollo *in vitro*, para caracterizar morfológicamente la cepa de *P. agaves*.
- II. Calcular el potencial de desarrollo micelial mediante la estimación de la velocidad máxima de crecimiento radial para evaluar la capacidad de invasión micelial de rastrojo maíz.
- III. Determinar el potencial productivo de *P. agaves* mediante el cálculo de la eficiencia biológica para destacar cualidades para la producción.
- IV. Calcular el impacto ambiental teórico del uso de sustratos invadidos con *P. agaves* mediante la estimación del índice de calentamiento global (ICG) para determinar el impacto del uso de tratamiento biológico del rastrojo de maíz.
- V. Determinar cambios en los fragmentos fermentables del rastrojo de maíz tratado con *P. agaves*, mediante la cuantificación de la cinética de producción de gas *in vitro* para establecer cambios en la calidad forrajera.



## HIPÓTESIS

---

El hongo de maguey "*Pleurotus agaves*" posee un elevado potencial biotecnológico ya que puede producir alimento con residuos de la agricultura como el rastrojo de maíz y así mismo proporcionar un ingrediente valioso en el uso de la alimentación animal además de minimizar la producción de gases de efecto invernadero emitidos por la ganadería.



## MATERIALES Y METÓDO

---

### MATERIAL BIOLÓGICO

Para llevar a cabo este estudio, se obtuvo una cepa de *Pleurotus agaves* del cepario del laboratorio de hongos comestibles y funcionales del Colegio de Posgraduados COLPOS, campus Puebla. Además, se consiguieron cepas de *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus djamor*, las cuales fueron proporcionadas por el cepario de hongos comestibles del Área de Biología de la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

### CULTIVO *IN VITRO*

Para este trabajo se utilizó medio de cultivo agar extracto de malta y levadura, el cual consistió en: 20 g/L de extracto de malta, 2 g/L de extracto de levadura, 2 g/L de polipeptona de caseína, 20 g/L de salvado de trigo y 20 g/L de agar. Se preparó el medio de cultivo y se ajustó el pH a 5.5 a 25 °C (Figura 8). Se esterilizó a 121 °C a una presión de 1.1 kg/cm<sup>2</sup> por 20 minutos. Se vertió en placas de Petri de 100 mm Ø, momento antes de se le adicionó antibiótico de amplio espectro y posteriormente se distribuyó en placas Petri y se incubó a 28 °C. Posteriormente, se realizó la multiplicación de micelio en fermentación sólida de las cepas de interés.



Figura 8. Elaboración de medios de cultivo.



Figura 9. Vertido de medio de cultivo.



De las placas de Petri con crecimiento micelial proporcionadas por los ceparios correspondientes, se transfirieron cuatro fragmentos cuadrados de 1 cm<sup>2</sup> de medio invadido por el micelio a nuevas placas de Petri con el medio de cultivo previamente mencionado. Este procedimiento se realizó con el objetivo de aumentar la cantidad de micelio de las cepas de *Pleurotus agaves*, *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus djamor*.

Además, se llevó a cabo una siembra colocando un fragmento de 4 mm de diámetro en el centro de cada placa de Petri. Sobre estas placas, se trazaron dos ejes perpendiculares, a lo largo de los cuales se registró el crecimiento radial del micelio cada 24 horas; con estos datos se calculó la tasa de crecimiento radial expresada en mm/hora.



Figura 10. Inicio de desarrollo micelial en dos ejes.

Para la descripción colonial: una vez que las colonias alcanzaron un crecimiento adecuado, se examinaron detenidamente utilizando un microscopio estereoscópico. En ese punto, se registraron minuciosamente las características macroscópicas de las colonias para cada cepa, incluyendo su forma, el patrón del



borde, la elevación, la textura, el color (anotando si había patrones de coloración), el tamaño alcanzado, el patrón de crecimiento y la velocidad de crecimiento.

Finalmente, se documentó la morfología macroscópica colonial de cada cepa, incluyendo descripciones textuales precisas y, de ser posible, registros fotográficos o dibujos que ilustraron las características observadas. Este registro exhaustivo permitirá comparar y contrastar las particularidades de *P. agaves*, *P. ostreatus* y *P. djamor*, lo cual es útil para su identificación y caracterización.

### GENERACIÓN DEL INOCULO

Para la preparación del inóculo, fundamental en el cultivo de hongos, se llevó a cabo la propagación o desarrollo masivo del micelio fúngico en granos de trigo (*Triticum aestivum* L.). Este proceso constituye la base para el cultivo posterior.

En primer lugar, se realizó el inóculo primario, que consistió en la propagación del micelio en semillas de trigo a partir del micelio previamente desarrollado en medio de cultivo (figura 11 y 12). Posteriormente, se preparó el inóculo secundario, el cual implicó una segunda propagación del micelio en más semillas de trigo, pero esta vez utilizando como fuente el inóculo primario previamente obtenido. De esta manera, se logró reproducir el micelio para disponer de una mayor cantidad de inóculo, el cual sería sembrado en el sustrato elegido para la producción final de los hongos comestibles.



Figura 11. Grano de trigo, estéril para inocular.



Figura 12. Inicio del desarrollo micelial en grano.



La preparación de estos inóculos primario y secundario fue crucial, ya que permitió contar con suficiente material fúngico viable y activo para iniciar el cultivo en el sustrato de producción (figura 13.), asegurando así un desarrollo óptimo de los hongos comestibles.



Figura 13. Inoculo maduro y activo de cepas de interés

## **PRODUCCIÓN DE ESPOROMAS Y CÁLCULO DE EFICIENCIA BIOLÓGICA**

### **Elección de sustratos**

Se seleccionó el rastrojo de maíz como sustrato debido a su abundancia y disponibilidad como esquilmo agrícola. El rastrojo de maíz se compone de los tallos, hojas y otros residuos vegetales que quedan en el campo después de la cosecha del grano. Esta elección se fundamenta en el hecho de que estos residuos representan una fuente renovable y accesible de material lignocelulósico, lo cual es ideal para su utilización como sustrato en diversos procesos biotecnológicos. Al seleccionar el rastrojo de maíz, se aprovecha un recurso que de otro modo sería desechado, contribuyendo así a una gestión más sostenible de los desechos agrícolas.



### **Preparación de sustratos**

El sustrato se humedece por sumersión en una solución de óxido de calcio (CaO) al 0.067 % (670 ppm), dejándolo reposar por 48 h. Trascurrido este tiempo se drenará y se dejará escurrir hasta eliminar el excedente de humedad. Posteriormente se pasa a bolsas de polipapel para ser pasteurizado a 95° C/120 min en calor húmedo.

### **Inoculación**

Para la inoculación se utiliza el micelio previamente elaborado correspondiente a cada cepa de interés. Se intercaló manualmente el micelio con capas alternas de sustrato, en un frasco de polipropileno de 1 dm<sup>3</sup> donde se inoculó un 5% de inculo con respecto al peso húmedo del sustrato.

### **Incubación**

Las unidades experimentales ya inoculadas debidamente rotuladas (figura 13.) se incuban en total oscuridad hasta la invasión total del micelio sobre el sustrato.



Figura 14. Unidades experimentales en incubación.



### Toma de muestras de sustrato

Una vez que el micelio ha invadido por completo en su totalidad el sustrato de cada unidad experimental, se toma una muestra de la parte central de le frasco. Se seca la muestra en horno de convección a una temperatura de 60 °C hasta peso constante y se guarda en bolsa hermética para la posterior determinación de cinética de producción de gas y parámetros de impacto ambiental.

### Fructificación.

Una vez que el micelio invadió por completo las unidades experimentales y el micelio colonizó en su totalidad el sustrato se trasladaron a un módulo donde podremos mantener iluminado sin tener luz solar directa y se elevó la humedad relativa al menos 75 %. Esto promovió la formación de primordios para donde se recolectó la primera cosecha (figura 14.)g. Posteriormente se estimuló al sustrato para alcanzar una segunda cosechas en cada tratamiento experimental.

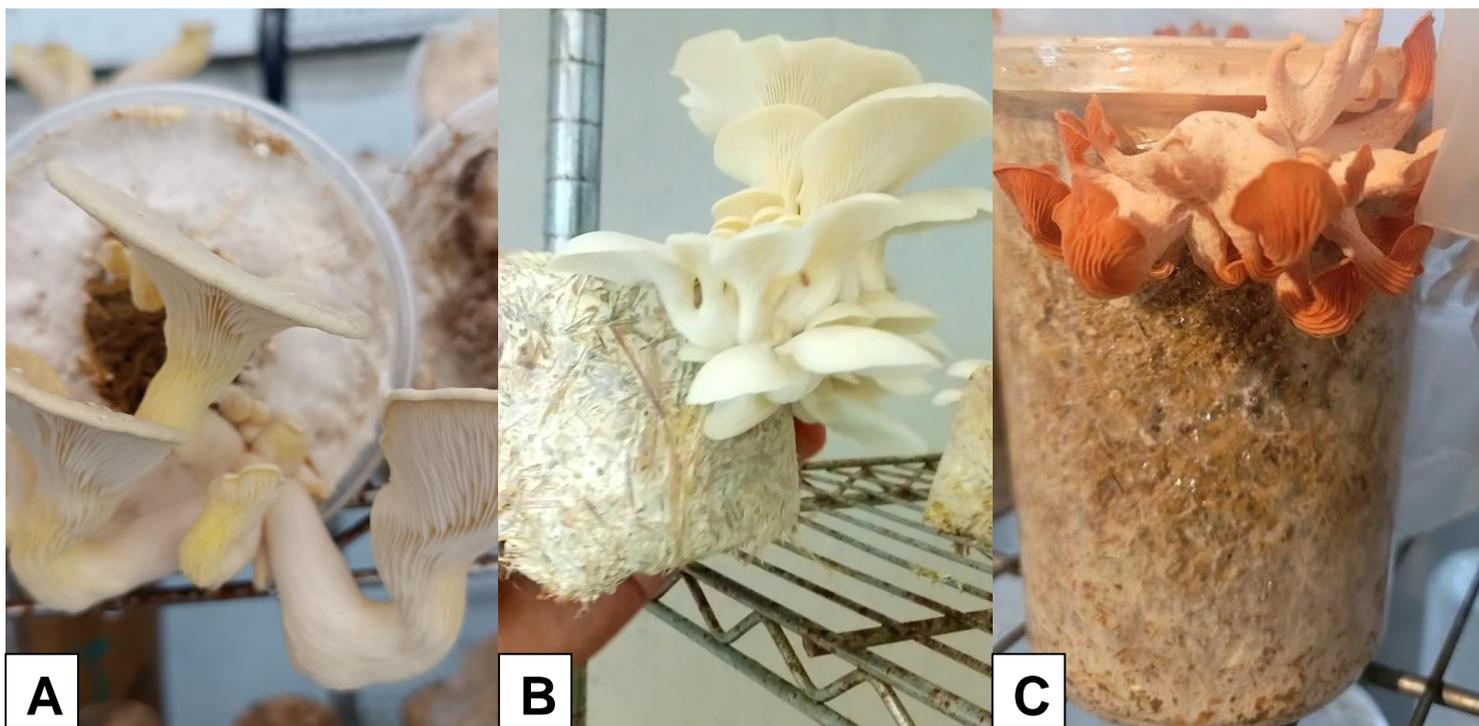


Figura 15. A fructificación de *Pleurotus agaves*, B fructificación de *Pleurotus ostreatus* y C fructificación de *Pleurotus djamor*



### **Cálculos de eficiencia biológica**

Se registraron las cosechas en fresco para la determinación de eficiencia biológica (EB%). La eficiencia biológica (EB%) en producción de hongos se refiere a la capacidad de un cultivo de hongos para producir biomasa o compuestos de interés en relación con la cantidad de sustrato o nutrientes utilizados. Esta eficiencia se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$EB\% = \frac{PHh (g)}{PSs (g)} \times 100$$

*EB= eficiencia biológica*

*PHs= peso húmedo del cuerpo fructífero*

*PSs= peso en seco del sustrato*

Esta fórmula proporciona una medida cuantitativa de la productividad del cultivo de hongos en relación con los recursos consumidos. Se propone una variación de la eficiencia biológica convencional, con una modificación presentada en la siguiente fórmula:

$$EBr \% = \frac{PHs (g)}{PSs (g)} \times 100$$

*EBr= eficiencia biológica real*

*PHs= peso en seco del cuerpo fructífero*

*PSs= peso en seco del sustrato*

## **TÉCNICA DE PRODUCCIÓN DE GASES POR FERMENTACIÓN *IN VITRO* Y ESTIMACIÓN DE INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL.**

### **Manejo de sustratos**

Antes de realizar la prueba, los sustratos fueron deshidratados manteniéndolos a una temperatura de 65°C durante un periodo de 48 horas, hasta que alcanzaron



un peso invariable. Posteriormente, las muestras de sustrato se trituraron utilizando un procesador de alimentos de la marca Oster, hasta conseguir un tamaño de partícula de 2 milímetros. De cada muestra triturada, se tomaron tres porciones de 0.5 gramos para cada tratamiento, y estas fueron colocadas en frascos de vidrio color ámbar con una capacidad de 60 mililitros.

### **Solución mineral reducida (SMR)**

Para elaborar un litro de Solución Mineral Reducida (SMR), fue necesario añadir 50 mililitros de una solución reductora a 950 mililitros de una solución mineral. Esto provocó la decoloración de la rezarsurina, un componente de la solución mineral, indicando la reducción de esta última. La adición del líquido ruminal se realizó después de obtener la solución mineral reducida.

Soluciones minerales stocks se preparan los siguientes dos stocks indicados en el cuadro 1.

<b>Cuadro 1. Composición de Stoks para fermentación <i>in vitro</i></b>		
<b>Solución mineral I</b>	<b>Solución mineral II</b>	<b>gL<sup>-1</sup> de agua destilada</b>
$K_2HPO_4$	$KH_2PO_4$	6
	$(NH_4)_2SO_4$	6
	$NaCl$	12
	$MgSO_4$	2.45
	$CaCl_2$	1.60
	$Na_2CO_3$	80

### **Solución mineral (SM)**

Para preparar la solución mineral, se combinaron diferentes soluciones stock en cantidades específicas. En un volumen de 750 ml de agua destilada, se agregaron 50 ml de una solución de carbonato de sodio al 8% p/v, 75 mL de la solución mineral I, 75 mL de la solución mineral II y dos gotas de una solución de rezarsurina al 0.1% p/v. Posteriormente, la solución mineral obtenida se colocó en un baño maría a una temperatura de 39 °C, manteniéndose bajo un flujo continuo de dióxido de carbono.



### **Solución reductora**

En un matraz de 100 mL, se añadieron 25 ml de agua destilada. Luego, se disolvieron en esta solución acuosa las siguientes sustancias: 2 mL de hidróxido de sodio de concentración 1 N, 0.5 g de sulfuro de sodio, 0.5 g de cisteína y una gota de una solución de rezarsurina. Posteriormente, el contenido del matraz se calentó sin agitación hasta que se produjo un cambio de color en la solución.

### **Origen del líquido ruminal**

Se obtuvo una muestra de líquido ruminal de un toro Holstein fistulado perteneciente a la granja experimental Chapingo, donde se le suministra una dieta de mantenimiento basada en ensilado de maíz. En el laboratorio, esta muestra se licuó durante 10 segundos y posteriormente se filtró a través de 8 capas de gasa (Figura 16.). Luego, se agregó a la solución mineral reducida (SMR) una proporción de 1 parte de líquido ruminal por cada 9 partes de SMR.



Figura 16. Procesamiento de líquido ruminal.

### **Vaciado de frascos**

Se añadieron 45 ml de inóculo diluido a cada frasco, mientras se mantenía un flujo continuo de dióxido de carbono (Utilizando una jeringa de 60 ml, se extrajeron y reemplazaron dos veces 45 ml de inóculo en cada frasco). Posteriormente, se detuvo el flujo de CO<sub>2</sub> y cada frasco se selló herméticamente con un tapón de goma y un aro de aluminio, utilizando una pinza engargoladora. A continuación, se eliminó el exceso de CO<sub>2</sub> en cada frasco hasta igualar la presión interna con la presión atmosférica. Finalmente, los frascos se colocaron en un baño maría (Figura 17).



Figura 17. Flujo de CO<sub>2</sub> en unidades experimentales y baño maría para fermentación *in vitro*.

**Cinética de producción de gas** (Quintanilla-Medina et al., 2020; Paulino Sánchez-Santillán et al., 2019).

Se preparo por sustrato tres frascos de 60 ml de capacidad y preparar 2 frascos sin sustrato que servirán de blanco. La cuantificación de la presión de gas se realizó cada 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 24, 30, 36, 42, 48, 60 y 72 horas con un nanómetro (1kg cm<sup>-2</sup>) al termino de lectura se volvía a igual la presión del frasco a cero (Figura 18.).



Figura 18. Lectura de presión de gas producido en fermentación.

Se realizó el cálculo el volumen máximo de producción de gas, la fase Lag (L) en horas que representa el tiempo teórico de invasión microbiana ruminal y la tasa de producción de gas en mL·h<sup>-1</sup> con base en la ecuación según

$$V = Vm(1 + e(2 - 4S(t0 - L)))$$



V= volumen de gas al tiempo t

V<sub>m</sub>= volumen máximo al tiempo t=∞

S= tasa de producción de gas

L= fase Lag

En esta misma fermentación se dividieron las producciones de gas en tres momentos, la primera de las 0 a las 8 horas considerada la fracción fermentable rápida (FFr) donde se fermentan principalmente los carbohidratos solubles, libres y simples. De las 8 a las 24 horas se considera la fracción fermentable media (FFm) donde se estima que en este periodo es el momento donde los oligosacáridos son fermentados seguido de la fracción fermentable lenta (FFl) de las 24 a 48 de fermentación, considerando este periodo en donde se fermentan los carbohidratos estructurales y finalmente la fracción fermentable total, que se calcula con la suma de las FFr, FFm y FFl.

#### **Fermentación para la estimación de composición de los gases**

Preparar por sustrato tres frascos de 60 mL de capacidad y preparar 2 frascos sin sustrato que servirán de blanco. Las mediciones de la presión de gas se realizaron cada 0, 6, 12, 18 y 24 horas con un nanómetro (1kg cm<sup>-2</sup>) al termino de lectura se volvía a igual la presión del frasco a cero.

#### ***Producción de metano, CO<sub>2</sub> e Indicadores de impacto ambiental***

Para medir la producción de metano y CO<sub>2</sub> se realizó en base a la metodología utilizada por Crosby & Ramírez, (2018) y Hernández, (2018) mediante el desplazamiento de un embolo de una jeringa de vidrio a las 6, 12, 18 y 24 horas, donde el desplazamiento del embolo marca la producción de gas total: Volumen de gas total.

Al volumen de gas total en la jeringa de vidrio se inyecta a un frasco con NaOH para que el CO<sub>2</sub> reaccione y quede atrapado en el NaOH y al hacer la nueva



medición el desplazamiento del embolo marque la producción de metano, y por diferencia se calcula el CO<sub>2</sub> formado así se obtiene el cálculo de metano teórico. Para la determinación del índice potencial de calentamiento global (IPCG) se considera que el metano tiene 23 veces mayor capacidad de retención calórica que el CO<sub>2</sub> por lo cual corresponde a la siguiente formula:

$$IPCG \text{ eq } CO_2 = CO_2 (mL \cdot g^{-1}MS) + (CH_4 (mL \cdot g^{-1}) \times 23)$$

IPCG= índice potencial de calentamiento global expresado en equivalentes de CO<sub>2</sub>·g<sup>-1</sup>MS

CO<sub>2</sub>= Producción de dióxido de carbono expresado en (mL · g<sup>-1</sup>MS)

CH<sub>4</sub>= Producción de metano teórico expresado en (mL · g<sup>-1</sup>MS)

Para el cálculo de índice de impacto ambiental, se calculó con siguiente formula:

$$IIA = \frac{IPCG}{Vta}$$

IIA= índice de impacto ambiental

IPCG= índice de potencial de calentamiento global

Vta= Volumen total acumulado en mL · g<sup>-1</sup>MS

### **Digestibilidad de la materia seca (DMS)**

Identificar los papeles filtro Whatman No. 40 con lápiz y deshidratarlos en la estufa a una temperatura de 65°C durante un periodo de 48 horas. Luego, registrar sus pesos. Una vez transcurridas las 72 horas de fermentación, filtrar el contenido de los frascos empleando una bomba de vacío y utilizando los papeles filtro previamente marcados. Los residuos atrapados en dichos papeles filtro se deben llevar nuevamente a la estufa, manteniéndolos a 65°C durante 48 horas más.

$$DivMS\% = \frac{(Pm) - (Pr) - (Pb)}{Pm} \times 100$$



DivMS= Digestibilidad *in vitro* de la materia seca en %

Pm= Peso de la muestra en gramos

Pr= Peso del residuo en gramos

Pb= Peso del blanco en gramos

## DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental utilizado en el crecimiento radial micelial, eficiencia biológica (EB%), cinética de fermentación y producción de gases de efecto invernadero e indicadores de impacto ambiental de este trabajo es un modelo completamente al azar.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ = es la observación de la variable respuesta para el tratamiento  $i$  en la unidad experimental  $j$

$\mu$  = es la media general de todas las observaciones.

$\tau_i$ = es el efecto del tratamiento  $i$ , donde  $t$  es el número total de tratamientos.

$\epsilon_{ij}$  es el error aleatorio asociado con la observación  $Y_{ij}$

Para el crecimiento radial se consideran tres tratamientos que corresponden a cada especie de *Pleurotus*. Se utilizó una placa Petri que representa una unidad experimental y se realizaron 6 repeticiones por tratamiento.

Para la eficiencia biológica en %, se contemplan tres tratamientos correspondientes a cada especie de *Pleurotus*, las unidades experimentales están representadas por frascos de 1dm<sup>3</sup> llenos de rastrojo de maíz e invadido de cada tratamiento, en este experimento se realizaron 5 repeticiones por tratamiento.



Para la cinética de fermentación y producción de gases de efecto invernadero se utilizó de igual manera un modelo completamente al azar, donde adicionalmente se utilizaron tres tiempos post-invasión del sustrato a las 24, 144 y 312 horas respectivamente con las tres especies de hongos por lo que en este experimento contamos con 9 tratamientos y un grupo control donde se utilizó rastrojo de maíz bruto. Para cada tratamiento se utilizaron 6 repeticiones y para el control se usaron 4.

### **ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Para el análisis estadístico se utilizó ANOVA (Análisis de Varianza) para cada experimento y posteriormente se realizó la prueba de diferenciación de medias por el método Tukey, el diseño experimental asociado fue el diseño completamente al azar.

Después de realizar ANOVA y encontrar diferencias significativas entre las medias de los grupos, se aplica la prueba de Tukey una precisión del 95 % ( $\alpha=0.05$ ) para realizar comparaciones. Estas pruebas estadísticas se realizaron en el programa Minitab 17.

Y el programa SAS se utilizó para estimar los valores de  $V_{max}$ , fase Lag y S con el modelo:

$$V = V_m (1 + e^{-2.4 S (t_0 - L)})$$



## Información sobre SAS® Studio

Información | Notas legales



**Versión: 3.81 (Edición Enterprise)**

**Navegadores compatibles:**

- Microsoft Internet Explorer 11
- Mozilla Firefox 21+
- Google Chrome 27+
- Apple Safari 6.0+ (con Apple OS X)

**Fecha de desarrollo:** 27/4/2022 13:21:36  
**Versión SAS:** 9.04.01M7P08062020  
**Plataforma SAS:** Linux LIN X64 3.10.0-1062.9.1.el7.x86\_64  
**Nombre del puesto:** SAS ONDEMAND FOR ACADEMICS  
**Número del puesto:** 70094220

Copyright © 2012-2020, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Acerca de Minitab



**Minitab**

**Licencia de producto conferida a:**  
jose.bostaurus2015@gmail.com

**Productos instalados:**  
Minitab® 17.3.1

© 2013, 2016 Minitab, Inc. All rights reserved.  
Minitab®, Quality. Analysis. Results.®, and the Minitab® logo are all registered trademarks of Minitab, Inc., in the United States and other countries. See [minitab.com/legal/trademarks](http://minitab.com/legal/trademarks) for more information.

Información del sistema

Reconocimientos

Aceptar

Figura 19. Se Muestran las versiones y las licencias de los programas estadísticos usados.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

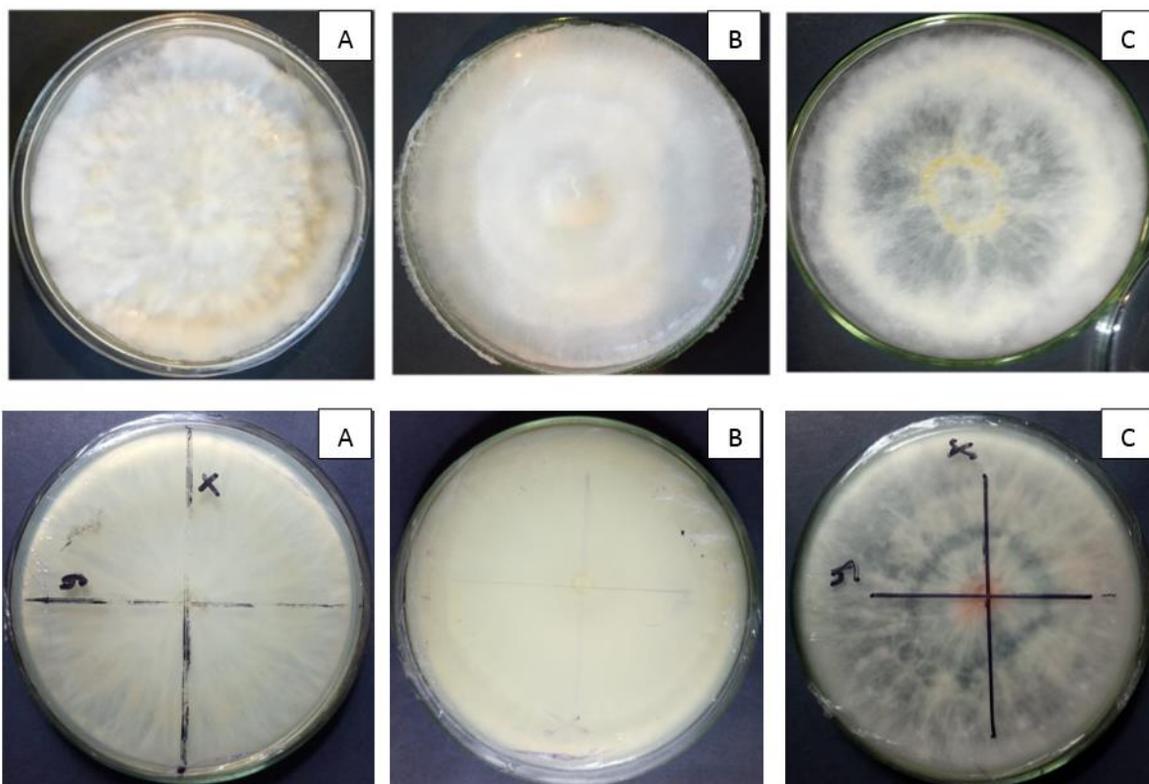


Figura 20. Morfología colonial de *Pleurotus agaves* (A), *Pleurotus ostreatus* (B) y *Pleurotus djamor* (C).

Para *P. agaves*, se observó un micelio denso algodonoso, blanco, con coloraciones cremas borde de la colonia regular y consistencia del micelio coriáceo, en contraste *P. ostreatus*, presenta un micelio denso, algodonoso color blanco, bordes regulares y consistencia suave. *P. djamor*, presenta un micelio poco denso, algodonoso, bordes regulares, presenta coloraciones rosas y una consistencia extremadamente suave.

**Cuadro 2. Comparación de la velocidad de crecimiento radial (mm/h) de *Pleurotus agaves*, *P. ostreatus* y *P. djamor*.**

<b>Especie</b>	<b>Velocidad de crecimiento radial (mm/h)</b>
<i>Pleurotus agaves</i>	0.0878 ± 0.0159 C
<i>Pleurotus ostreatus</i>	0.1518 ± 0.0049 B
<i>Pleurotus djamor</i>	0.1287 ± 0.1260 A

**Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes con prueba Tukey con un nivel de significancia  $\alpha=0.05$**

A partir de los datos experimentales presentados en el Cuadro 2, se observa que la velocidad de crecimiento radial (VCR) del hongo *Pleurotus agaves* fue significativamente menor con  $0.0878 \pm 0.0159$  mm/h en comparación con *Pleurotus ostreatus* que obtuvo  $0.1518 \pm 0.0049$  mm/h y *Pleurotus djamor* obtuvo  $0.1287 \pm 0.1260$  mm/h. Estos resultados son contrastantes con los reportados por Coello-Loor et al. (2017), quien reporta que *Pleurotus ostreatus* presentó un mejor comportamiento en VCR de 0.569 y 0.49 mm/h en dos medios usados en su estudio y son significativamente superiores a los obtenidos en el presente trabajo. Sin embargo, Angulo Zubieta et al. (2022) evaluaron el crecimiento del micelio de *Pleurotus ostreatus* en diferentes medios de cultivo (PDA, SDA, ELA, BHIA) y encontraron que el medio PDA presentó un crecimiento radiales significativamente menores de 0.014 mm/h, 0.005 mm/h, 0.004 mm/h y 0.0054 mm/h respectivamente. En el caso del experimento con *Pleurotus agaves*, sería recomendable explorar diferentes medios de cultivo y condiciones para optimizar su VCR, ya que como se menciona en las citas, el medio de cultivo puede influir significativamente en el

crecimiento y desarrollo de los hongos del género *Pleurotus*. Además, sería interesante comparar el comportamiento de *Pleurotus agaves* con otras especies del mismo género en condiciones similares para tener una mejor comprensión de su potencial y adaptabilidad.

En resumen, mientras que *Pleurotus agaves* mostró una velocidad de crecimiento radial menor en comparación con *P. ostreatus* y *P. djamor* en las condiciones experimentales evaluadas, es importante explorar diferentes medios de cultivo y condiciones para optimizar su crecimiento y desarrollo, considerando que las citas muestran que estas variables pueden influir significativamente en el desempeño de los hongos del género *Pleurotus*.



**Cuadro 3. Eficiencia biológica (%) de especies de *Pleurotus*.**

	<b>EB% 1er corte</b>	<b>EBr % 1er corte</b>	<b>EB% 2er corte</b>	<b>EBr % 2er corte</b>	<b>EBt %</b>	<b>EBtr %</b>
<b><i>Pleurotus agaves</i></b>	63.170 ± 16.790 A	7.670 ± 2.040 A	37.160 ± 15.690 A	4.515 ± 1.907 A	100.300 ± 25.100 A	12.250 ± 307 A
<b><i>Pleurotus ostreatus</i></b>	62.140 ± 14.460 A	7.550 ± 1.760 A	19.750 ± 5.720 B	2.399 ± 0.695 B	81.890 ± 11.860 A	9.949 ± 1.441 A
<b><i>Pleurotus djamor</i></b>	38.570 ± 7.580 B	4.690 ± 0.920 B	7.284 ± 1.016 C	0.885 ± 0.123 C	45.890 ± 14.810 B	5.592 ± 1.806 B

\***EB %= Eficiencia Biológica**

\***EBr %= Eficiencia Biológica real**

\***EBt %= Eficiencia Biológica total**

\***EBtr%= Eficiencia Biológica total real**

**Las medias que no comparten una letra en cada columna son significativamente diferentes en prueba tukey  $\alpha$ : 0.05**

Según el Cuadro 3, la especie *Pleurotus agaves* mostró la mayor eficiencia biológica total (EBt%) con 100.300 ± 25.100%, superando significativamente a *P. ostreatus* (81.890 ± 11.860%) y *P. djamor* (45.890 ± 14.810%). Además, *P. agaves* presentó la mayor eficiencia biológica total real (EBtr%) con 12.250 ± 3.07%. Estos resultados resaltan el potencial de *P. agaves* como una especie promisorio para el cultivo de hongos comestibles.

*P. agaves* supera a la reportada para otras especies de *Pleurotus* cultivadas en diferentes sustratos. Royse & Sánchez-Vázquez, (2017) reportaron una eficiencia biológica de 125% para *P. ostreatus* cultivado en una mezcla de paja de cereal (70%) y pulpa de café (30%), mientras que Hernández et al. (2003) obtuvieron una eficiencia del 93% utilizando *Digitaria decumbens* (70%) y pulpa de café.

Asimismo, los resultados obtenidos para *P. agaves* son superiores a los reportados por Bonilla-Lavado et al., (2006), quienes encontraron una eficiencia biológica de solo 21.90% para *P. ostreatus* cultivado en una mezcla de aserrín de madera (40%), estopa de coco (40%) y *Tithonia diversifolia* (20%).

Estos resultados sugieren que *P. agaves* podría ser una especie más eficiente en el aprovechamiento de sustratos para la producción de biomasa comestible en comparación con otras especies de *Pleurotus*. Sin embargo, es importante considerar que la eficiencia biológica puede variar dependiendo de las condiciones de cultivo y el sustrato utilizado.

En este sentido, los hallazgos de Pardo et al. (2008) muestran que la eficiencia biológica de *P. ostreatus* puede alcanzar valores superiores al 80% cuando se cultiva en mezclas de paja de cereales y kenaf u otros residuos agrícolas. Esto indica que la selección adecuada del sustrato y las condiciones de cultivo pueden optimizar la eficiencia biológica de los hongos del género *Pleurotus*.

Por lo tanto, sería interesante explorar el cultivo de *P. agaves* en diferentes sustratos y condiciones para determinar su potencial máximo de eficiencia biológica y aprovechar al máximo su capacidad para la producción de biomasa comestible y el aprovechamiento de residuos agrícolas.

Otro aspecto relevante para destacar es que en el presente estudio se evaluó la eficiencia biológica en dos cortes, lo cual permitió analizar el potencial de producción de *P. agaves* de manera eficiente. Los resultados muestran que esta especie mantuvo una eficiencia biológica considerable en el segundo corte ( $37.160 \pm$

15.690%), lo que sugiere su capacidad para producir múltiples cosechas de manera eficiente.

En resumen, los hallazgos de este estudio resaltan el potencial de *P. agaves* como una especie promisorio para el cultivo de hongos comestibles, dada su alta eficiencia biológica en comparación con otras especies de *Pleurotus*. Sin embargo, se requieren más investigaciones para optimizar las condiciones de cultivo y evaluar su desempeño en diferentes sustratos, con el fin de aprovechar al máximo su potencial productivo y de aprovechamiento de residuos agrícolas.



**Cuadro 4. Cinética de producción de gas**

<b>Tratamiento</b>	<b>Vmax (mL·g<sup>-1</sup> MS)</b>	<b>Fase L (h)</b>	<b>S (mL·h<sup>-1</sup>)</b>
<i>P. agaves</i> 24h	190.98±11.49 C	6.23±0.29 F	0.029±0.0006 A
<i>P. ostreatus</i> 24h	209.67±5.17 B	9.03±0.28 CD	0.0269±0.0003 BCD
<i>P. djamor</i> 24h	221.27±6.71 AB	3.99±0.50 G	0.0280±0.0006 BC
<i>P. agaves</i> 144h	206.97±4.52 B	6.27±0.58 F	0.0266±0.0007 D
<i>P. ostreatus</i> 144h	225.30±7.77 A	8.57±0.15 D	0.0306±0.0005 A
<i>P. djamor</i> 144h	210.42±6.76 B	5.89±0.52 F	0.0281±0.0003 B
<i>P. agaves</i> 312h	133.72±11.76 E	10.72±0.96 B	0.0261±0.0009 D
<i>P. ostreatus</i> 312h	189.97±6.00 C	9.85±0.42 BC	0.0273±0.0009 BCD
<i>P. djamor</i> 312h	163.00±3.94 D	7.36±0.27 E	0.0265±0.0007 D
Rastrojo bruto	153.18±5.81 D	16.03±0.58 A	0.0267±0.0006 CD

**\*Vmax: Volumen máximo en mililitros por gramo de materia seca**

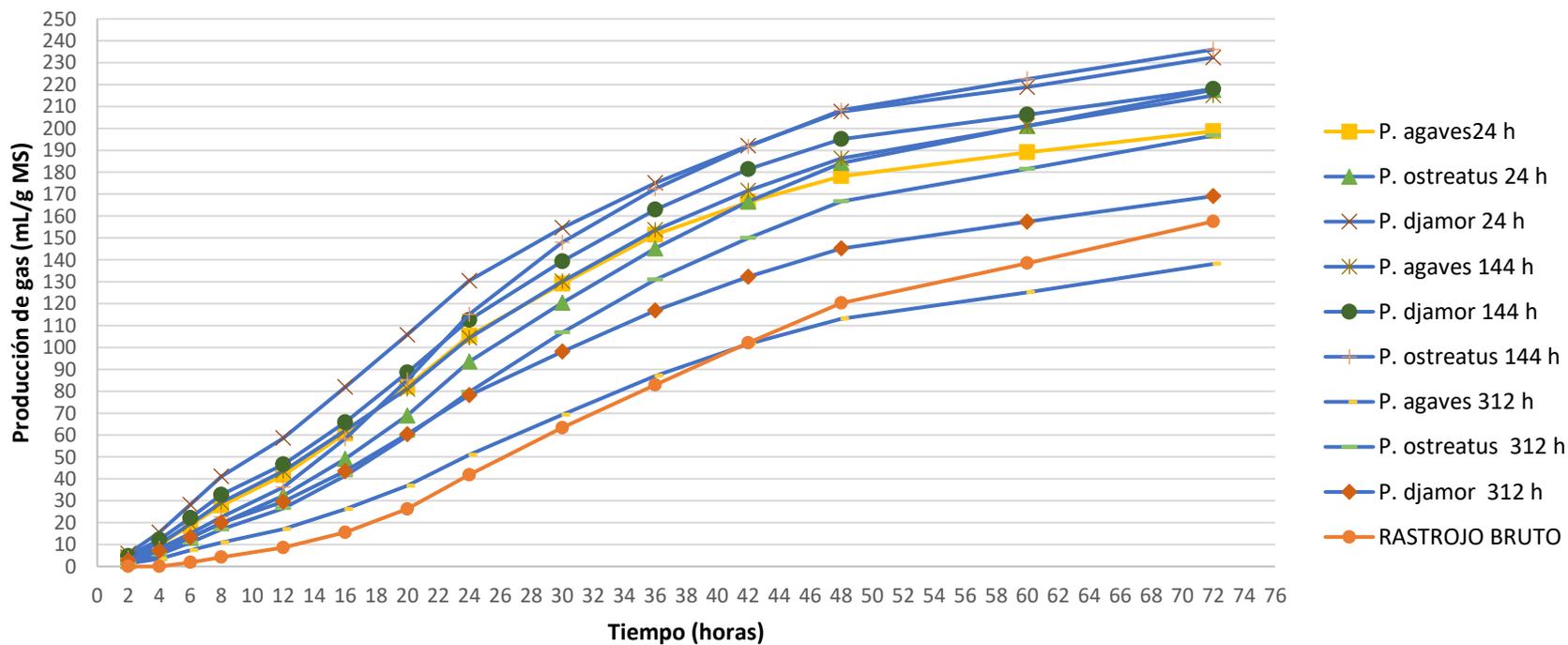
**\*Fase L: Fase Lag, fase de invasión total de microorganismos en el sustrato en horas**

**\*S: Tasa específica de producción de gas en mililitros por hora**

**Las medias que no comparten una letra en cada columna son significativamente diferentes en prueba tukey  $\alpha$ : 0.05**



Figura 21. Producción acumulada de gas en fermentación *in vitro* de rastrojos tratados con *Pleurotus* a 72 hrs.





En cuanto 4 y figura 21 se muestra el volumen máximo de producción de gas ( $V_{max}$ ), los valores obtenidos para *P. agaves* a las 24h ( $190.98 \text{ mLg}^{-1} \text{ MS}$ ) y 144h ( $206.97 \text{ mL g}^{-1} \text{ MS}$ ) de fermentación son comparables a los reportados por Peláez et al. (2008) con  $188.83 \text{ mL g}^{-1} \text{ MS}$  para *Pleurotus sapidus* en caña de azúcar, y superiores a los obtenidos por Arce-Cervantes, (2012) con  $140.4 \text{ mL g}^{-1} \text{ MS}$  para rastrojo bruto sin tratamiento fúngico. Sin embargo, son inferiores a los valores reportados por Villegas-Castañeda, y Álvarez-Cervantes (2010) con  $264.75 \text{ mL g}^{-1} \text{ MS}$  para paja de sorgo tratada con *P. sapidus*, y a los obtenidos por De la Rosa-Zariñana et al. (2023) con alimentos concentrados para borregos ( $462.1\text{-}493.2 \text{ mL g}^{-1} \text{ MS}$ ).

En relación a la fase lag (L) o fase de retardo, *P. agaves* presentó valores de 6.23h y 6.27h para 24h y 144h de fermentación, respectivamente, los cuales son ligeramente superiores a los 3.13h reportados por Peláez et al. (2008) para *P. sapidus*, pero inferiores a los 16.03h obtenidos para el rastrojo bruto sin tratamiento. Esto indica una invasión más rápida del sustrato por parte de *P. agaves* en comparación con el sustrato sin tratar.

Respecto a la tasa específica de producción de gas (S), los valores obtenidos para *P. agaves* ( $0.029 \text{ mL h}^{-1}$  para 24h y  $0.0266 \text{ mL h}^{-1}$  para 144h) son similares a los reportados por Peláez et al. (2008) con  $0.0248 \text{ mL h}^{-1}$  para *P. sapidus*, y superiores a los obtenidos por Villegas-Castañeda et al., (2010) con  $0.01 \text{ mL/h}$  para paja de sorgo tratada con *P. sapidus*. Sin embargo, son inferiores a los valores reportados por Araiza-Rosales et al. (2021) con  $0.08 \text{ mL h}^{-1}$  para rastrojo de maíz tratado con *P. ostreatus*.

En general, los resultados obtenidos para *P. agaves* son prometedores y comparables a los reportados en la literatura para otros hongos del género *Pleurotus* en diferentes sustratos lignocelulósicos (Peláez et al., 2008; Villegas-Castañeda et al., 2010; Araiza-Rosales et al., 2021). Esto resalta el potencial biotecnológico de *P. agaves* para el tratamiento y valorización de residuos agroindustriales, así como para la producción de biomasa fúngica rica en proteínas y otros compuestos de interés.



**Cuadro 5. Fracciones fermentables de rastrojos de maíz tratados con hongo del género *Pleurotus* a diferentes tiempos post invasión total.**

Tratamiento	FFr (g·kg <sup>-1</sup> )	FFm (g·kg <sup>-1</sup> )	FFI (g·kg <sup>-1</sup> )	FFt (g·kg <sup>-1</sup> )
<i>P. agaves</i> 24h	65.10±2.35 C	126.15±10.32 B	210.71±13.73 EF	401.90±25.10 CD
<i>P. ostreatus</i> 24h	46.13±2.06 E	120.01±3.68 B	262.58±9.11 AB	428.71±13.08 BC
<i>P. djamor</i> 24h	96.24±4.38 A	145.23±5.39 A	223.55±11.85 DE	465.03±14.30 A
<i>P. agaves</i> 144h	68.44±6.19 C	122.13±6.10 B	237.35±5.63 CD	427.92±10.91 BC
<i>P. ostreatus</i> 144h	52.85±2.29 D	150.39±3.40 A	269.82±11.19 A	473.07±15.82 A
<i>P. djamor</i> 144h	76.65±3.13 B	129.82±3.84 B	238.94±16.32 BCD	445.41±15.97 AB
<i>P. agaves</i> 312h	25.68±1.97 G	64.93±5.23 D	180.06±22.01 G	270.70±26.40 F
<i>P. ostreatus</i> 312h	39.63±2.98 F	101.96±6.21 C	251.95±7.87 ABC	393.55±13.07 D
<i>P. djamor</i> 312h	46.67±1.50 E	94.73±3.74 C	193.96±11.04 FG	335.36±10.75 E
Rastrojo bruto	10.24±1.18 H	101.96±6.21 D	225.16±10.46 CDE	296.60±11.25 F

**\*FFr= Fracción Fermentable rápida**

**\*FFm= Fracción Fermentable media**

**\*FFI= Fracción Fermentable lenta**

**\*FFt=Fracción Fermentable total**

**Las medias que no comparten una letra en cada columna son significativamente diferentes en prueba tukey  $\alpha$ : 0.05**



#### Fracción Fermentable Rápida (FFr):

Los valores obtenidos de FFr para los tratamientos con *P. agaves*, *P. ostreatus* y *P. djamor* a los diferentes tiempos post-invasión (24h, 144h y 312h) se encuentran en un rango de 25.68 a 96.24 %, siendo superiores a los reportados por Villegas-Castañeda et al. (2010) con 11.317 % para paja de sorgo tratada con *P. sapidus*. Sin embargo, son inferiores a los valores reportados por De la Rosa- Zariñana et al., (2023) para alimentos concentrados en borregos, que oscilan entre 19.9 y 21.9 %.

#### Fracción Fermentable Media (FFm):

En cuanto a la FFm, los valores obtenidos en los tratamientos fúngicos se encuentran en un rango de 64.93 a 150.39 %, siendo superiores a los reportados por Villegas-Castañeda et al. (2010) con 23.257 %. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado por De la Rosa-Zariñana et al. (2023) para alimentos concentrados en borregos (19.0 a 52.3 %).

#### Fracción Fermentable Lenta (FFI):

Para la FFI, los valores obtenidos oscilan entre 180.06 y 269.82 %, siendo superiores a los reportados por Villegas-Castañeda et al. (2010) con 31.626 %, y también superiores al rango reportado por De la Rosa-Zariñana et al. (2023) para alimentos concentrados en borregos (27.4 a 30.3 %).

#### Fracción Fermentable Total (FFt):

En cuanto a la FFt, los valores obtenidos en los tratamientos fúngicos se encuentran en un rango de 270.70 a 475.03 %, siendo superiores al valor reportado por Villegas-Castañeda et al. (2010) de 66.2 % para paja de sorgo tratada con *P. sapidus*.

En general, los resultados obtenidos muestran que el tratamiento de los rastrojos de maíz con hongos del género *Pleurotus* produce un incremento en las fracciones fermentables, especialmente en la fracción fermentable lenta (FFI), en comparación con los valores reportados en la literatura para otros sustratos lignocelulósicos. Esto sugiere que los hongos *Pleurotus* tienen la capacidad de degradar y modificar la composición de los rastrojos de maíz, aumentando la disponibilidad de fracciones fermentables para su posterior aprovechamiento en la alimentación animal o en procesos de fermentación.



Estos resultados sugieren que *P. agaves* exhibe un patrón de degradación intermedio de las diferentes fracciones fermentables del rastrojo de maíz en comparación con *P. ostreatus* y *P. djamor*. Si bien *P. agaves* no mostró un desempeño sobresaliente en la degradación de ninguna fracción en particular, tampoco presentó valores extremadamente bajos, excepto para la FFm después de 312h.

Como especie nativa, *P. agaves* podría estar mejor adaptada a las condiciones ambientales locales y al sustrato utilizado en el experimento, lo que podría explicar su desempeño moderado en la degradación de las fracciones fermentables del rastrojo de maíz.

Los resultados obtenidos brindan información valiosa sobre el potencial de *P. agaves* como alternativa viable para la valorización del rastrojo de maíz en procesos biotecnológicos, especialmente en lo que respecta a la degradación de carbohidratos estructurales (FFI) y la fermentación total de carbohidratos (FFt).



**Cuadro 6. Producción de gases de efecto invernadero e indicadores de impacto ambiental de rastrojos de maíz tratados con varias especies de *Pleurotus*.**

Tratamiento	Vt (mL·g <sup>-1</sup> MS)	CH <sub>4</sub> teórico (mL·g <sup>-1</sup> MS)	CH <sub>4</sub> %	IPCG (mL CO <sub>2</sub> eq·g <sup>-1</sup> MS)	IIA (eq CO <sub>2</sub> )	DivMS (%)
<i>P. agaves</i> 24h	116.38±20.03 BC	31.40±7.60 ABC	26.76±3.69 A	797.8±182.6 ABC	6.81±0.80 A	62.69±1.72 B
<i>P. ostreatus</i> 24h	106.56±07.49 C	27.77±2.76 BC	26.06±1.88 AB	709.3±65.3 BC	6.66±0.41 AB	58.77±1.31 BC
<i>P. djamor</i> 24h	146.94±10.49 A	37.97±4.17 A	25.85±2.46 AB	970.9±96.6 A	6.61±0.53 AB	71.01±0.84 A
<i>P. agaves</i> 144h	133.38±08.71 AB	31.99±4.80 AB	24.11±4.15 ABC	827.6±102.5 AB	6.23±0.90 ABC	55.21±3.07 CD
<i>P. ostreatus</i> 144h	139.02±10.81 A	27.65±6.19 BC	19.75±3.46 C	739.0±143.3 BC	5.29±0.75 C	70.41±2.21 A
<i>P. djamor</i> 144h	137.54±08.33 AB	28.40±3.38 BC	20.61±1.76 BC	753.8±80.0 BC	5.47±0.38 BC	62.69±3.77 B
<i>P. agaves</i> 312h	107.99±11.69 C	23.32±3.26 CD	21.68±2.97 ABC	614.0±76.3 CD	5.70±0.64 ABC	50.85±4.55 D
<i>P. ostreatus</i> 312h	82.21±12.51 D	17.83±2.60 DE	21.77±1.80 ABC	469.1±67.4 D	5.72±0.39 ABC	62.28±3.23 B
<i>P. djamor</i> 312h	81.14±00.61 D	15.61±3.49 DE	19.25±4.39 C	419.9±75.2 DE	5.18±0.95 C	57.61±4.11 BC
Rastrojo bruto	42.24±10.28 E	9.03±2.50 E	21.47±3.72 ABC	238.1±62.9 E	5.66±0.81 ABC	57.85±0.18 BC

\*Vt= Volumen total

\*CH<sub>4</sub>= metano

\*IPCG= Índice de Potencial de Calentamiento Global

\*IIA= Índice de Impacto Ambiental

DivMS= Digestibilidad *in vitro* de la Materia Seca

Las medias que no comparten una letra en cada columna son significativamente diferentes en prueba tukey  $\alpha$ : 0.05

Volumen total de gas producido (Vt):

Para *P. agaves* se observó una disminución significativa en el volumen total de gas producido a medida que aumentaba el tiempo de fermentación, desde 116.38 mLg<sup>-1</sup> MS a las 24h hasta 107.99 mL<sup>-1</sup> MS a las 312h. Estos valores son inferiores a los reportados por Villegas-Castañeda et al. (2010) para paja de sorgo tratada con *P. sapidus* (264.75 mL<sup>-1</sup> MS).

Producción de metano teórico (CH<sub>4</sub> Teórico):

*P. agaves* mostró valores elevados de metano teórico a las 24h (31.40 mL<sup>-1</sup>MS) y 144h (31.99 mL<sup>-1</sup> MS), superando a los reportados por Araiza-Rosales et al. (2021) y Villegas-Castañeda et al. (2010) para rastrojo de maíz y paja de sorgo tratados con *P. sapidus*, (9.7 mL<sup>-1</sup>MS).

Porcentaje de metano producido (CH<sub>4</sub> %):

*P. agaves* a las 24h (26.76%) presentó el valor más alto de porcentaje de metano producido, similar a *P. ostreatus* a las 24h (26.06%) y *P. djamor* a las 24h (25.85%).

Índice de Potencial de Calentamiento Global (IPCG):

El valor más alto de IPCG se presentó en *P. agaves* a las 144h (827.6 mL CO<sub>2</sub> eq g<sup>-1</sup> MS), siendo superior a los reportados por Araiza-Rosales et al. (2021) y Villegas-Castañeda et al. (2010) con 282.1 mL CO<sub>2</sub> eq g<sup>-1</sup> MS, pero dentro del rango reportado por De la Rosa-Zariñana et al. (2023) para alimentos concentrados en borregos (692.0 a 809.8 mL CO<sub>2</sub> eq g<sup>-1</sup> MS).

Índice de Impacto Ambiental (IIA):

No se observaron diferencias significativas entre *P. agaves* y el rastrojo bruto, con valores similares a los reportados por De la Rosa-Zariñana et al. (2023) para alimentos concentrados en borregos (3.3 a 3.9).

Digestibilidad *in vitro* de la Materia Seca (Div MS):

*P. agaves* a las 24h (64.40%) y 144h (63.89%) presentó valores de DIVMS similares a los reportados por Peláez et al. (2008) con 64.8% para caña de azúcar tratada con *P. sapidus*. Sin embargo, a las 312h, *P. agaves* mostró el valor más bajo (50.85%), inferior al rastrojo bruto (57.85%) y a los valores reportados por Arce-Cervantes (2012) para rastrojo tratado con Fibrozyme (47.4%).

Los resultados sugieren que *P. agaves* tiene un potencial prometedor para el tratamiento del rastrojo de maíz, mostrando valores elevados de producción de metano teórico y porcentaje de metano producido, especialmente a tiempos cortos de fermentación (24h y 144h). Además, los valores de DIVMS a estos tiempos son comparables a los reportados en la literatura para otros sustratos lignocelulósicos tratados con hongos del género *Pleurotus*.

Sin embargo, es importante considerar que a tiempos más prolongados de fermentación (312h), *P. agaves* presentó una disminución en la producción de gases, así como en la digestibilidad del sustrato. Esto podría indicar una posible degradación excesiva del sustrato a tiempos prolongados, afectando su capacidad de fermentación y digestibilidad.

Es necesario encontrar un equilibrio óptimo entre el tiempo de fermentación, la producción de gases de efecto invernadero y la digestibilidad del sustrato para aprovechar al máximo el potencial biotecnológico de *P. agaves* en el tratamiento y valorización del rastrojo de maíz.



## CONCLUSIÓN

---

En conclusión, los resultados obtenidos en este estudio destacan el prometedor potencial biotecnológico de *Pleurotus agaves*, un hongo nativo del centro de México, para su aplicación en procesos de valorización de residuos agroindustriales como el rastrojo de maíz.

Si bien *P. agaves* no mostró un desempeño sobresaliente en la degradación de todas las fracciones fermentables evaluadas en comparación con las especies comerciales *P. ostreatus* y *P. djamor*, su rendimiento fue comparable, e incluso superior en algunos aspectos, como la eficiencia biológica total y real.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la alta eficiencia biológica exhibida por *P. agaves*, alcanzando valores similares a los de *P. ostreatus* y superando significativamente a *P. djamor*. Esta característica destaca el potencial de *P. agaves* para su cultivo comercial, aprovechando su adaptación a las condiciones ambientales locales y su habilidad para aprovechar eficientemente los sustratos disponibles en la región.

Además, *P. agaves* demostró ser capaz de iniciar la fermentación del rastrojo de maíz de manera más rápida que el sustrato sin tratar, lo que sugiere su capacidad para mejorar la degradabilidad y accesibilidad de los carbohidratos estructurales presentes en este residuo agrícola.

En cuanto a su impacto ambiental, *P. agaves* presentó niveles de producción de gases de efecto invernadero, como el metano, comparables a los de otras especies de *Pleurotus* y al rastrojo sin tratar. Si bien una mayor producción de metano puede representar un desafío ambiental, también podría ser aprovechada como fuente de biogás en sistemas de producción de energía renovable.

Es importante resaltar que *P. agaves*, al ser una especie nativa de la región, podría contribuir al desarrollo de una industria de hongos comestibles más sostenible y adaptada a las condiciones locales, aprovechando los recursos naturales disponibles y promoviendo la conservación de la biodiversidad fúngica regional.



En resumen, los resultados obtenidos destacan el potencial biotecnológico de *P. agaves* para su aplicación en procesos de valorización de residuos agroindustriales, como el tratamiento del rastrojo de maíz, con posibles beneficios económicos, ambientales y sociales. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales para optimizar su desempeño y evaluar su potencial en otras aplicaciones biotecnológicas, como la producción de enzimas, compuestos bioactivos o biocombustibles.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- Alvarado-Castillo, G., Mata, G., & Benítez-Badillo, G. (2015). The importance of domestication in the conservation of edible wild fungi in Mexico. *Bosque*, 36(2), 151–161. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000200001>
- Andrino, A., Morte, A., & Honrubia, M. (2011). Caracterización y cultivo de tres cepas de *Pleurotus eryngii* (Fries) Quélet sobre sustratos basados en residuos agroalimentarios. *Anales de Biología*, 33, 53–66.
- Angulo Zubieta, F. M., Mamani Sánchez, B., & Nova Pinedo, M. (2022). Crecimiento in vitro de hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*) en diferentes medios de cultivo. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 9(1). <https://doi.org/10.53287/yspr1253nr82s>
- Araiza-Rosales, E., González-Arreola, A., Pámanes-Carrasco, G., Murillo-Ortiz, M., Jiménez-Ocampo, R., & Herrera-Torres, E. (2021). Calidad fermentativa y producción de metano en ensilados de rastrojo de maíz adicionados con nopal fermentado y sin fermentar Fermentative quality and methane production in corn stover silage with fermented and unfermented nopal cactus INTRODUCCIÓN En el. *Abanico Veterinario*, 1–13.
- Arce-Cervantes, O. (2012). *Producción de extractos enzimáticos a partir de Fomes sp. EUM1 y su evaluación en condiciones ruminales*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Asociación Micológica Internacional, & Instituto de Biodiversidad Fúngica de Westerdijk. (2005). *Base de datos de MYCO BANCO*. 2005. <https://www.mycobank.org/>
- Ayala, S. N. E., Portillo, L. A., Villarreal, G. L. L., Rico, M. R., & Soria, M. I. E. (2016). Los Hongos como fuente de recursos farmacológicos: *Ganoderma lucidum*; *Grifola frondosa*; y *Pleurotus ostreatus*. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 20(58), 12.
- Azevedo, E., & Barata, M. (2018). Diversidade no reino Fungi e aplicações à Indústria. *Revista de Ciência Elementar*, 6(4), 1–7. <https://doi.org/10.24927/rce2018.077>
- Badalyan, S. M., & Rapior, S. (2021). Agaricomycetes mushrooms (Basidiomycota) as potential neuroprotectants. *Italian Journal of Mycology*, 50, 30–43. <https://doi.org/10.6092/issn.2531-7342/12542>



- Balcerzak, L., Gibka, J., Sikora, M., Kula, J., & Strub, D. J. (2019). Minor constituents of essential oils and aromatic extracts. Oximes derived from natural flavor and fragrance raw materials – Sensory evaluation, spectral and gas chromatographic characteristics. *Food Chemistry*, 301(February), 125283. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125283>
- Bárcena, A., Samaniego, J., Peres Núñez, W., Alatorre, J. E., & Alatorre, J. E. (2020). *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe*. UN. <https://doi.org/10.18356/1f198404-es>
- Barrales, M., & Mata, G. (2016). Selección De Cepas Nativas Del Hongo De Maguey (Pleurotus opuntiae) Y Evaluación De Su Producción En Sustratos Fermentados. *Interciencia*, 41(5), 346–352.
- Barros, L., Baptista, P., Estevinho, L. M., & Ferreira, I. C. F. R. (2007). Bioactive properties of the medicinal mushroom *Leucopaxillus giganteus* mycelium obtained in the presence of different nitrogen sources. *Food Chemistry*, 105(1), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.063>
- Beltrán, D. Y., Morris, Q. H., Domínguez, O. D., Batista, C. P., & Llauradó, M. G. (2021). Mycochemical composition and antioxidant activity of *pleurotus ostreatus* mushroom in different growth stages. *Acta Biologica Colombiana*, 26(1), 89–98. <https://doi.org/10.15446/abc.v26n1.84519>
- Beluhan, S., & Ranogajec, A. (2011). Chemical composition and non-volatile components of Croatian wild edible mushrooms. *Food Chemistry*, 124(3), 1076–1082. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.081>
- Bharathiraja, B., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Arulraj, J. V., Vinoshmuthukumar, P., & Saravanaraj, A. (2014). Bioethanol Production from Lignocellulosic Materials - An Overview. *THE SCITECH JOURNAL*, 01(2348–2311).
- Bonilla-Lavado, H. A., Vásquez-Acosta, N. B., & Rubiano-Rodríguez, J. A. (2006). Evaluación de residuos orgánicos (coco y aserrín) para la producción de *Pleurotus ostreatus* (Jacq.fr) en Bueventura. *Revista institucional, Universidad Tecnológica del Chocó*, 24(January 2006), 54–59.
- Bonilla, J. A. C., & Lemus, C. F. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. Revisión. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 3(2), 215–246.
- Brijwani, K., Oberoi, H. S., & Vadlani, P. V. (2010). Production of a cellulolytic enzyme system in mixed-culture solid-state fermentation of soybean hulls supplemented with wheat bran. *Process Biochemistry*, 45(1), 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.08.015>
- Camacho, M., Guzmán, G., & Guzmán-Dávalos, L. (2012). *Pleurotus opuntiae* (Durieu et Lév.) Sacc. (higher Basidiomycetes) and other species related to



- Agave and Opuntia plants in Mexico-taxonomy, distribution, and applications. *International journal of medicinal mushrooms*, 14(1), 65–78. <https://doi.org/10.1615/INTJMEDMUSHR.V14.I1.70>
- Cano-Estrada, A., & Romero-Bautista, L. (2016). Valor económico, nutricional y medicinal de hongos comestibles silvestres. *Revista chilena de nutrición*, 43(1), 75–80. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182016000100011>
- Cano, M., Neri, C., López, A. L., Castorena, J. H., & Santiago, V. (2021). Removal of Textile Dyes Using Trametes Versicolor, Pleurotus Ostreatus and Agaricus Bisporus. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 12(1), 1–11.
- Carmona, J. C., Bolívar, D. M., & Giraldo, L. A. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(1), 49–63.
- Casas, A. (2016). Conservación in situ y ex situ de recursos genéticos. En *Domesticación en el continente americano* (pp. 346–359). [https://www.researchgate.net/publication/309783058\\_Conseervacion\\_in\\_situ\\_y\\_ex\\_situ\\_de\\_recursos\\_geneticos](https://www.researchgate.net/publication/309783058_Conseervacion_in_situ_y_ex_situ_de_recursos_geneticos)
- Chang, S. T., & Wasser, S. P. (2012). The role of culinary-medicinal mushrooms on human welfare with a pyramid model for human health. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 14(2), 95–134. <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushr.v14.i2.10>
- Coello-Loor, C. D., Avellaneda-Cevallos, J. H., Barrera-Álvarez, A. E., Peña-Galeas, M. M., Yépez Macías, P. F., & Racines-Macías, E. R. (2017). Evaluación del crecimiento y producción de biomasa de dos cepas del género Pleurotus spp., cultivadas en un medio agar con diferentes sustratos. *Ciencia y Tecnología*, 10(2). <https://doi.org/10.18779/cyt.v10i2.164>
- Cohen, R., Persky, L., & Hadar, Y. (2002). Biotechnological applications and potential of wood-degrading mushrooms of the genus Pleurotus. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 58(5), 582–594. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-0930-y>
- Conrado, R., Gomes, T. C., Roque, G. S. C., & De Souza, A. O. (2022). Overview of Bioactive Fungal Secondary Metabolites: Cytotoxic and Antimicrobial Compounds. *Antibiotics*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/antibiotics11111604>
- Crespo, C. I. D. (2021). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE BIODEGRADACIÓN DE LOS HONGOS PLEUROTUS OSTREATUS Y CITRINOPILEATUS OSTREATUS EN AGUAS RESIDUALES DE FAENAMIENTO*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA.
- De la Rosa- Zariñana, A. E., Miranda-Romero, L. A., Martínez-Hernández, P. A., Vargas-Villamil, L. M., & Elmasry, A. (2023). Nivel de proteína y energía en la fermentación in vitro de dietas para borregos. *Ecosistemas y Recursos*



*Agropecuarios*, 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3545>

- De Silva, D. D., Rapior, S., Sudarman, E., Stadler, M., Xu, J., Aisyah Alias, S., & Hyde, K. D. (2013). Bioactive metabolites from macrofungi: Ethnopharmacology, biological activities and chemistry. *Fungal Diversity*, 62(1), 1–40. <https://doi.org/10.1007/s13225-013-0265-2>
- Del Moral-Hernández, A., Lozada-García, J. A., Carmona-Hernández, O., & Barrientos-Salcedo, C. (2021). Metabolitos bioactivos en *Pleurotus* spp. y su potencial como alimento funcional. *Jornal CIM*, 9(1).
- Delfín-Alcalá, I., & Durán-De-Bazúa, C. (2003). Biodegradación de residuos urbanos lignocelulósicos por *Pleurotus*. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 19(1), 37–45.
- Erjavec, J., Kos, J., Ravnikar, M., Dreo, T., & Sabotič, J. (2012). Proteins of higher fungi - from forest to application. *Trends in Biotechnology*, 30(5), 259–273. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.01.004>
- Gaitán-Hernandez, R., Salmones, D., Pérez, M. R., & Mata, G. (2006). Manual Práctico Del Cultivo Y Siembra. En INECOL (Ed.), *Instituto de Ecología* (1ra ed.). <http://www.biomicel.com/Interes/Tecnologia/28.pdf>
- Giavasis, I. (2014). Bioactive fungal polysaccharides as potential functional ingredients in food and nutraceuticals. *Current Opinion in Biotechnology*, 26, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.01.010>
- Gómez, J. M. U., Yepes, S. A. J., & Rosales, R. B. (2013). Nutritional characterization of the crop residue of mushroom *Agaricus bisporus* as a potential feed for cattle. *Rev CES Med Zotec*, 8(1), 37–59. <http://www.scielo.org.co/pdf/cmz/v8n1/v8n1a04.pdf>
- Grisales, L. A. (2017). *Hongos (reino Fungi): características y clasificación o tipos. paradais*.
- Györfi, J. (2010). Mushrooms as functional foods. *International Journal of Horticultural Science*, 16(5), 7–12.
- Hassett, B. T., Al-Shaibi, B. K., Al-Nabhani, A., & Al-Sadi, A. M. (2020). New species of aquatic chytrids from Oman. *Mycologia*, 112(4). <https://doi.org/10.1080/00275514.2020.1761226>
- He, M. Q., Zhao, R. L., Hyde, K. D., Begerow, D., Kemler, M., Yurkov, A., McKenzie, E. H. C., Raspé, O., Kakishima, M., Sánchez-Ramírez, S., Vellinga, E. C., Halling, R., Papp, V., Zmitrovich, I. V., Buyck, B., Ertz, D., Wijayawardene, N. N., Cui, B. K., Schoutteten, N., ... Kirk, P. M. (2019). Notes, outline and divergence times of Basidiomycota. *Fungal Diversity*, 99(1), 105–367. <https://doi.org/10.1007/s13225-019-00435-4>
- Heleno, S. A., Barros, L., Martins, A., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Glamoclija, J.,



- Sokovic, M., & Ferreira, I. C. F. R. (2015). Nutritional value, bioactive compounds, antimicrobial activity and bioaccessibility studies with wild edible mushrooms. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), 799–806. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.04.028>
- Heleno, S. A., Martins, A., Queiroz, M. J. R. P., & Ferreira, I. C. F. R. (2015). Bioactivity of phenolic acids: Metabolites versus parent compounds: A review. *Food Chemistry*, 173, 501–513. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.057>
- Heredia-Abarca, G. (2020). La importancia de los hongos (Fungi) en los servicios ecosistémicos. *Bioagrocencias*, 13(2), 98–108.
- Heredia-Acuña, C., Alarcón, A., Hernández-Curvas, L. V., Ferrera-Cerrato, R., & Almaraz-Suarez, J. J. (2014). DIVERSIDAD, ECOLOGÍA E IMPORTANCIA POTENCIAL DE LOS HONGOS ENDÓFITOS SEPTADOS OSCUROS EN MÉXICO. *Botanical Sciences*, 92(3), 321–333.
- Hernández, D., Sánchez, J. E., & Yamasaki, K. (2003). A simple procedure for preparing substrate for *Pleurotus ostreatus* cultivation. *Bioresource Technology*, 90(2), 145–150. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00118-4)
- Herrera, H. L. P., & Ocorima, E. J. L. (2021). *Eficiencia de la biorremediación de suelos contaminados con petróleo por acción del Hongo Pleurotus Ostreatus* [Universidad César Vallejo]. [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez\\_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Hill, R., Leitch, I. J., & Gaya, E. (2021). Targeting Ascomycota genomes: what and how big? En *Fungal Biology Reviews* (Vol. 36). <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.03.003>
- Huaping, L., Huajie, Z., Zheng, G., Xinling, S., Wenshuai, W., Fangfang, Y., Yanbo, F., Yiwen, Z., Jianjun, Z., Shuliang, Z., & Le, J. (2019). The Antioxidant and Anti-Aging Effects of Acetylated Mycelia Polysaccharides from *Pleurotus djamor*. *Molecules*, 24(2698), 1–20.
- Huerta, G., Martínez-carrera, D., Sánchez, J. E., & Leal-Lara, H. (2009). Grupos de intersterilidad y productividad de *Pleurotus* de regiones tropicales y subtropicales de México. *Revista Mexicana de Micología*, November 2008.
- Isikhuemhen, O. S., & Mikiashvili, N. A. (2009). Lignocellulolytic enzyme activity, substrate utilization, and mushroom yield by *Pleurotus ostreatus* cultivated on substrate containing anaerobic digester solids. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 36(11), 1353–1362. <https://doi.org/10.1007/s10295-009-0620-1>
- Jayachandran, M., Xiao, J., & Xu, B. (2017). A critical review on health promoting benefits of edible mushrooms through gut microbiota. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(9). <https://doi.org/10.3390/ijms18091934>



- Kalač, P. (2013). A review of chemical composition and nutritional value of wild-growing and cultivated mushrooms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(2), 209–218. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5960>
- Kalogeropoulos, N., Yanni, A. E., Koutrotsios, G., & Aloupi, M. (2013). Bioactive microconstituents and antioxidant properties of wild edible mushrooms from the island of Lesbos, Greece. *Food and Chemical Toxicology*, 55, 378–385. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.01.010>
- Kaya, A., & Uzun, Y. (2018). New contributions to the Turkish ascomycota. *Turkish Journal of Botany*, 42(5), 644–652. <https://doi.org/10.3906/bot-1712-1>
- Kim, B. H., & Gadd, G. M. (2008). *Bacterial Physiology and Metabolism* (C. U. PRESS (ed.); First publ, Número september 2016).
- Kirk, P. M., Cannon, P., & Stalpers, J. (2008). *Ainworth and Bisby 's Dictionary of the Fungi*. January, 2008–2009.
- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., & Tricarico, J. M. (2014). Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>
- Kues, U., & Liu, Y. (2000). Fruiting body production in basidiomycetes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 54(2), 141–152. <https://doi.org/10.1007/s002530000396>
- Kuhar, F., Valeria, C., & Papinutti, L. (2013). Reino Fungi: morfologías y estructuras de los hongos. *REVISTA BOLETÍN BIOLÓGICA*, 28(January), 11–118.
- Kulshreshtha, S., Mathur, N., & Bhatnagar, P. (2014). Mushroom as a product and their role in mycoremediation. *AMB Express*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s13568-014-0029-8>
- Lakhanpal, T. N., & Rana, M. (2005). Medicinal and nutraceutical genetic resources of mushrooms. *Plant Genetic Resources*, 3(2), 288–303. <https://doi.org/10.1079/pgr200581>
- Li, C., & Xu, S. (2022). Edible mushroom industry in China: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(11), 3949–3955. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11985-0>
- Llaurado, G., Morris, H. J., Lebeque, Y., Guilarte, A., Guiérrez, A., & Benrán, Y. (2018). Efecto de un producto nutracéutico de setas *Pleurotus* sobre la respuesta inmune de ratones inmunocompetentes de ambos sexos. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 37(3), 1–20.
- Loi, M., Logrieco, A. F., Pusztahelyi, T., Leiter, É., Hornok, L., & Pócsi, I. (2023). Advanced mycotoxin control and decontamination techniques in view of an increased aflatoxin risk in Europe due to climate change. *Frontiers in*



- Microbiology*, 13(January), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1085891>
- López-García, A., Pérez-Moreno, J., Jiménez-Ruiz, M., Ojeda-Trejo, E., Delgadillo-Martínez, J., & Hernández-Santiago, F. (2020). Conocimiento tradicional de hongos de importancia biocultural en siete comunidades de la región chinanteca del estado de Oaxaca, México. *Scientia Fungorum*, 50(November), e1280. <https://doi.org/10.33885/sf.2020.50.1280>
- Matos, P. S., da Silva, C. F., Damian, J. M., Cerri, C. E. P., Pereira, M. G., & Zonta, E. (2022). Beneficial services of glomalin and arbuscular mycorrhizal fungi in degraded soils in Brazil. *Scientia Agricola*, 79(5). <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0064>
- Mattila, P., Könkö, K., Eurola, M., Pihlava, J. M., Astola, J., Vahteristo, L., Hietaniemi, V., Kumpulainen, J., Valtonen, M., & Piironen, V. (2001). Contents of vitamins, mineral elements, and some phenolic compounds in cultivated mushrooms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(5), 2343–2348. <https://doi.org/10.1021/jf001525d>
- Mshandete, A. M., & Cuff, J. (2008). Cultivation of three types of indigenous wild edible mushrooms: *Coprinus cinereus*, *Pleurotus flabellatus* and *Volvariella volvacea* on composted sisal decortication residue in Tanzania. *African Journal of Biotechnology*, 7(24), 4551–4562.
- Nieto Juárez, J. I., Cuzcano Ruiz, A. D., & Reyes López, W. A. (2021). Evaluación del cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus* y de su composición nutricional en borra de café. *Tecnia*, 21(2). <https://doi.org/10.21754/tecnica.v21i2.1026>
- Ozcirak, E. S., & Ozturk, U. R. (2017). Production of ligninolytic enzymes by solid state fermentation using *Pleurotus ostreatus*. *Annals of Agrarian Science*, 15(2), 273–277. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.04.003>
- Palacios, I., Lozano, M., Moro, C., D'Arrigo, M., Rostagno, M. A., Martínez, J. A., García-Lafuente, A., Guillamón, E., & Villares, A. (2011). Antioxidant properties of phenolic compounds occurring in edible mushrooms. *Food Chemistry*, 128(3), 674–678. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.085>
- Pardo, A., M.A. Perona, J. Pardo, 2008. Evaluación de nuevos materiales en la elaboración de sustratos específicos para cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Jacq. ex Fr.) Kummer. Cuadernos de Fito- patología 85: 77-84
- Papaspyridi, L. M., Katapodis, P., Gonou-Zagou, Z., Kapsanaki-Gotsi, E., & Christakopoulos, P. (2010). Optimization of biomass production with enhanced glucan and dietary fibres content by *Pleurotus ostreatus* ATHUM 4438 under submerged culture. *Biochemical Engineering Journal*, 50(3), 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.04.008>
- Peláez, A. A., Meneses, M. M., Miranda, L. A. R., Megías, M. D. R., Barcena, R. G., & Loera, O. (2008). Advantages of solid fermentation state with *Pleurotus sapidus*



in sugar cane silage. *Archivos de Zootecnia*, 57(217), 25–33.

- Peña, M. M. G. (2013). *COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DEGRADABILIDAD in situ DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE MAÍZ INOCULADOS CON DOS CEPAS DEL GÉNERO Pleurotus. FINCA LA MARÍA. 2012. UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO.*
- Piepenbring, M., López, F., & Cáceres, O. (2016). La importancia de los Hongos en los Ecosistemas. *Puente Biológico*, 8.
- Portilla, A., Romero-Arenas, O., Valencia de Ita, M. D. los Á., Hernández, M. Á. E., Lanteta, G. C., & 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. *Scientia Fungorum*, 49(October), e1216. <https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1216>
- Pozdnyakova, N. N., Rodakiewicz-Nowak, J., Turkovskaya, O. V., & Haber, J. (2006). Oxidative degradation of polyaromatic hydrocarbons and their derivatives catalyzed directly by the yellow laccase from *Pleurotus ostreatus* D1. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 41(1–2), 8–15. <https://doi.org/10.1016/J.MOLCATB.2006.04.002>
- Prasad, B. R., Kumar, S. S., & Krushna, P. R. (2022). Bioconversion of Lignocellulosic Biomass into Bioethanol: A Sustainable Approach. *Research Journal of Biotechnology*, 17(11), 147–154. <https://doi.org/10.25303/1711rjbt1470154>
- Quintanilla-Medina, J. J., López-Aguirre, D., Martínez-González, J. C., Limas-Martínez, A. G., Lucero-Magaña, F. A., Ruíz-García, S., & Hernández-Meléndez, J. (2020). In vitro digestibility of diets with different levels of inclusion of moringa (*Moringa olifera*) for growing lambs. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Peru*, 31(3), 1–10. <https://doi.org/10.15381/RIVEP.V31I3.16840>
- Ragunathan, R., & Swaminathan, K. (2003). Nutritional status of *Pleurotus* spp. grown on various agro-wastes. *Food Chemistry*, 80(3), 371–375. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00275-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00275-3)
- Ramírez-Bribiesca, J. E. (2018). Chemical-Physiological Events of Methane in Ruminants. *Agroproductividad*, 11(2), 22–33.
- Ramírez, A. A. C. (2009). *Estudio de las propiedades bioactivas de hongos comestibles para el diseño de productos cárnicos funcionales.* UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID FACULTAD.
- Relling, A. E., & Mattioli, G. A. . (2003). Fisiología digestiva y metabólica de los rumiantes. En *Edulp*.
- Rodwel, V. W. (2016). *Harper: Bioquímica ilustrada Harpers* (S. A. de C. V. McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES (ed.); 30a ed. Mc).



www.booksmedicos.org

- Rojas, D., Palacio, A. M., Ospina, S. P., Zapata, P., & Atehortúa, L. (2012). DESARROLLO DE ALIMENTOS FUNCIONALES : PROCESOS DE SECADO vs . CAPACIDAD ANTIOXIDANTE. *Vitae*, 19, 231–233.
- Royse, D. J., Baars, J., & Tan, Q. (2017). Current Overview of Mushroom Production in the World. *Edible and Medicinal Mushrooms: Technology and Applications*, 2010, 5–13.
- Royse, D. J., & Sánchez-Vázquez, J. E. (2017). PRODUCCIÓN MUNDIAL DE SETAS *Pleurotus* spp. CON ÉNFASIS EN PAÍSES IBEROAMERICANOS. En J. E. S. y D. J. Royse (Ed.), *La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas Pleurotus spp* (1ra edició, pp. 17–28).
- Salazar-Vidal, V. (2016). *Manual de Micología Básica* (O. Micófilos (ed.); Priimera).
- Sánchez-Santillán, P., Torres-Cardona, M. G., Campos-Montiel, R. G., Soriano-Robles, R., Fernández-Luqueño, F., Medina-Pérez, G., Del Razo-Rodríguez, O. E., & Almaraz-Buendía, I. (2018). Potencial de emisión de gases efecto invernadero de plantas forrajeras por fermentación entérica. *Agroproductividad*, 11(2), 40–45.  
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=01887394&AN=128827440&h=ZQXorrf4FcV5J1t85srbd0hU95%2FBKw%2BhZGonoz3EbqDOq2H5X8MOuD3ZjUVaxki8uWln7DKHQCVsUsqAoBuXsQ%3D%3D&crl=c>
- Sánchez-Santillán, Paulino, Torres-Salado, N., Rojas-García, A. R., Bottini-Luzardo, M. B., Maldonado-Peralta, M. Á., Escobar-España, J. C., Reyes-Vázquez, I., Manuel-Luviano, D., & Herrera-Pérez, J. (2019). CINÉTICA DE PRODUCCIÓN DE GAS Y CARACTERÍSTICAS FERMENTATIVAS *In vitro* DE LA SUSTITUCIÓN DE MELAZA DE CAÑA POR PULPA DE MANGO EN LA ELABORACIÓN DE BLOQUES NUTRICIONALES KINETICS OF GAS PRODUCTION AND *In vitro* FERMENTATIVE CHARACTERISTICS OF THE SUBSTITUTI. 957–967.
- Sánchez-Vázquez, J. E., Martínez-Carrera, D., Mata, G., & Leal-Lara, H. (2007). *El cultivo de setas Pleurotus spp. en México* (E. C. de la F. Sur (ed.); 1raEdición, Número January 2007).
- Sánchez, C. (2010). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(5), 1321–1337.  
<https://doi.org/10.1007/s00253-009-2343-7>
- Sánchez, J. E., & Royse, D. J. (2001). *La biología y el cultivo de Pleurotus spp.* (1ra edició).
- Santos, M. P., Marcante, R. C., Santana, T. T., Tanaka, H. S., Funari, P., Alberton, L. R., Faria, E. V., Valle, J. S., Colauto, N. B., & Linde, G. A. (2015). Oyster



- culinary-medicinal mushroom, pleurotus ostreatus (Higher basidiomycetes), growth in grain-based diet improves broiler chicken production. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 17(2), 169–178. <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.v17.i2.80>
- Singhania, R. R., Sukumaran, R. K., Patel, A. K., Larroche, C., & Pandey, A. (2010). Advancement and comparative profiles in the production technologies using solid-state and submerged fermentation for microbial cellulases. *Enzyme and Microbial Technology*, 46(7), 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2010.03.010>
- Strullu-Derrien, C., Spencer, A. R. T., Goral, T., Dee, J., Honegger, R., Kenrick, P., Longcore, J. E., & Berbee, M. L. (2018). New insights into the evolutionary history of fungi from a 407 Ma blastocladiomycota fossil showing a complex hyphal thallus. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1739). <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0502>
- Suárez-Machín, C., & Guevara-Rodríguez, C. A. (2017). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* en la alimentación de rumiantes. Revisión bibliográfica. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 51(2), 21–30.
- Valencia de Ita, M. Á., Castañeda Antonio, M. D., Huerta Lara, M., & Romero Arenas, O. (2019). Carrizo silvestre (*Arundo donax*) como sustrato alternativo en la producción de *Pleurotus ostreatus*. *Scientia Fungorum*, 48, 15–22. <https://doi.org/10.33885/sf.2018.48.1231>
- Valverde, M. E., Hernández-Pérez, T., & Paredes-López, O. (2015). Edible Mushrooms: Improving Human Health and Promoting Quality Life. *International Journal of Microbiology*, 2015(Table 1), IFC. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1874390017303634>
- Villegas-Castañeda, M., Meneses-Mayo, M., Miranda-Romero, L. A., & Loera-Corral, O. (2010). In vitro gas production and dry matter disappearance of solid culture with ligninolytic fungi. *Agrociencia*, 44(8), 917–929.
- White, M. M., James, T. Y., O'Donnell, K., Cafaro, M. J., Tanabe, Y., & Sugiyama, J. (2006). Phylogeny of the Zygomycota based on nuclear ribosomal sequence data. *Mycologia*, 98(6), 872–884. <https://doi.org/10.3852/mycologia.98.6.872>
- Zapata, J. C. (2021). Taxonomía y clasificación de los hongos fitopatógenos. En *Principios básicos de hongos fitopatógenos*. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1tqcwkn.10>
- Zięba, P., Sękara, A., Sułkowska-Ziaja, K., & Muszyńska, B. (2020). Culinary and medicinal mushrooms: Insight into growing technologies. *Acta Mycologica*, 55(2), 1–19. <https://doi.org/10.5586/am.5526>
- Zúñiga-Castro, K., & Quirós-Cedeño, G. (2021). Los hongos como elementos clave en la productividad del suelo, la agricultura y el bienestar social. *Biocenosis*,



32(1), 46–58. <https://doi.org/10.22458/rb.v32i1.3548>