



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
INSTITUTO DE CIENCIAS
CENTRO DE AGROECOLOGÍA
MAESTRÍA EN MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

TESIS para el grado de Maestría

**MANEJO SOSTENIBLE DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA LA
PRODUCCIÓN DE *Hericum erinaceus* EN COMUNIDADES DEL
ALTIPLANO POBLANO (OCOTEPEC, PIZARRO Y
CHICHICUAUTLA)**

PRESENTA
ANDREA BARAJAS MONTIEL

COMITÉ TUTORAL

DIRECTOR DE TESIS
DR. RICARDO IRVING PÉREZ LÓPEZ

CODIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ FILOMENO CONRADO PARRAGUIRRE

ASESORES
DR. OMAR ROMERO ARENAS
DR. JOSÉ ANTONIO RIVERA TAPIA
DR. ANABEL ROMERO LÓPEZ

Puebla, Pue., Noviembre, 2025



BUAP

La presente tesis, titulada: **"MANEJO SOSTENIBLE DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA LA PRODUCCIÓN DE *Hericum erinaceus* EN COMUNIDADES DEL ALTIPLANO POBLANO (OCOTEPEC, PIZARRO Y CHICHICUAUTLA)"**, realizada por la alumna IBT **Andrea Barajas Montiel**, bajo la dirección del Comité Tutorial indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN
MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

COMITÉ TUTORIAL:

DIRECTOR: _____
Dr. Ricardo Irving. Pérez López

CO-DIRECTOR: _____
Dr. José Filomeno Conrado Parraguirre Lezama

ASESOR: _____
Dr. José Antonio Rivera Tapia

ASESOR: _____
Dr. Omar Romero Arenas

ASESORA EXTERNA: _____
Dra. Anabel Romero López

REVISORA EXTERNA: _____
M.C. María de los Angeles Valencia de Ita

Puebla, Pue., diciembre de 2025.

Posgrado en Manejo Sostenible de Agroecosistemas
Instituto de Ciencias (ICUAP)

Av. 14 sur 6301, Edificio IC4.
Ciudad Universitaria
Col. San Manuel, Puebla, Pue., C.P. 72570
01 (222) 2295500 Ext. 7063
masagro@correo.buap.mx

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	5
II. JUSTIFICACIÓN.....	8
III. MARCO TEÓRICO	10
3.1 Manejo de residuos agrícolas	10
3.1.1 Generación y problemática de los residuos agrícolas en México	10
3.1.2 Importancia de la gestión apropiada de residuos agrícolas para el desarrollo sostenible	12
3.2 Hongos comestibles y Medicinales	15
3.2.1 Importancia de los hongos en sistemas agroecológicos	15
3.2.2 <i>Hericium erinaceus</i> : características y propiedades nutraceuticas	16
3.2.3 Compuestos bioactivos: polisacáridos, nucleósidos, lectinas y otros	19
3.3 Agroecología, economía circular y bioeconomía.....	23
3.4 Transición agroecológica y soberanía alimentaria	25
3.5 Evaluación de la sustentabilidad.....	27
3.5.1 Enfoque sistémico	27
3.5.2 Indicadores, criterios y dimensiones de análisis	28
3.6 MESMIS como marco de referencia en la construcción de indicadores.....	29
3.6.1 MESMIS como referencia para la construcción y aplicación de indicadores	30
3.6.2 Importancia de los indicadores sustentables.....	30
3.7 Investigación de acción participativa	31
3.7.1 Enfoque colaborativo y rol de los actores locales.....	31
3.7.2 Herramientas participativas y su relación con el enfoque MESMIS	33
IV. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	33
4.1 Enfoque de la investigación	33
4.2 Pregunta de investigación	34
V. HIPÓTESIS.....	34
VI. OBJETIVOS	35
6.1 Objetivo general	35
6.2 Objetivos específicos.....	35
VII. MATERIALES Y METODOS	35
7.1 Zona de estudio: Ocoatepec, Pizarro y Chichicautla, Puebla.	35
7.1.1 Contexto agrícola y manejo de residuos.....	37
7.1.2 Tipos de cultivos predominantes y estacionalidad	38
7.2 Objetivo específico 1.	39
7.2.1 Dimensiones de análisis	39
7.2.2 Levantamiento de la información	40
7.2.3 Construcción de indicadores e instrumentos de medición.....	40
7.2.4 Dimensiones e indicadores evaluados	41
7.3 Objetivo específico 2.....	47

7.3.1 Origen de la cepa y producción de inóculo.....	47
7.3.2 Inoculación en residuos agrícolas predominantes.....	47
7.3.3 Determinación de parámetros bromatológicos y estimación de la relación C/N.....	48
7.3.4 Análisis estadísticos.....	49
7.4 Objetivo específico 3.....	49
7.4.1 Purificación y caracterización química del extracto crudo de <i>Hericiium erinaceus</i> sobre diferentes residuos agrícolas.....	49
7.4.2 Integración y validación de resultados de la caracterización química.....	52
VIII. RESULTADOS Y DISCUSION.....	52
8.1 Panorama general de niveles de sustentabilidad.....	52
8.2 Análisis multivariado de sostenibilidad comunitaria.....	57
8.3 Evaluación biológica del cultivo de <i>Hericiium erinaceus</i>.....	60
8.4 Caracterización de los metabolitos presentes en <i>Hericiium erinaceus</i>.....	64
8.4.1 Espectroscopia infrarroja (IR).....	65
8.4.2 Resonancia magnética nuclear (¹ H-RMN).....	66
IX. CONCLUSIONES.....	67
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a SECIHTI, por su invaluable apoyo y confianza, así como por la beca otorgada, que hizo posible la realización de esta tesis. Su acompañamiento y las oportunidades brindadas fueron fundamentales para mi formación académica y profesional.

Agradezco también al Centro de Agroecología y al Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por proporcionarme el espacio, las herramientas y el respaldo institucional necesarios para el desarrollo de este trabajo.

A mi comité de tesis, expreso mi más sincera gratitud:

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Ricardo Irving Pérez López

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. José Filomeno Conrado Parraguirre

ASESORES

Dr. Omar Romero Arenas

Dr. José Antonio Rivera Tapia

Dra. Anabel Romero López

Deseo hacer un énfasis especial en el Dr. Omar Romero Arenas, pues sin él no habría llegado hasta aquí. Le agradezco profundamente la confianza que me dio desde el primer día, su constante apoyo y la certeza de que siempre conté con su guía. Su acompañamiento marcó una diferencia decisiva en mi camino académico.

A mi familia, gracias por ser mi pilar inquebrantable.

A mi abuelo Arturo E. Barajas Martínez, quien ha sido una de mis mayores inspiraciones por su ejemplo de trabajo, disciplina y pasión por hacer las cosas con entrega. Su legado vive en cada paso que doy.

A César, gracias por acompañarme en todo este proceso, por tu presencia, paciencia y apoyo constante, incluso en los momentos más desafiantes.

A mis colegas y amigos Mtr. Miguel Alejandro, Mtr. Suriel Enrique y Mtr. Omar Kareem, gracias por compartir ideas, desvelos y motivación. A mis compañeros de laboratorio, por su disposición, colaboración y por hacer más ligero el camino científico.

A mis amigos que hicieron mis días más ligeros, gracias por su compañía, sus risas, sus palabras de ánimo y por recordarme que incluso en los momentos más demandantes siempre hay espacio para la alegría. Su presencia fue un refugio invaluable en este proceso.

A Burial, por acompañarme con buena música en tantas noches de desvelo, convirtiéndose, sin saberlo, en banda sonora de este camino.

A mis alumnos del Colegio Inter Canadiense, quienes llegaron en el momento indicado y transformaron mi experiencia de docente en una de las más significativas de mi vida. Gracias por recordarme día con día por qué vale la pena enseñar. A mis compañeros de trabajo, por su apoyo, comprensión y por cada palabra que me impulsó a continuar.

Finalmente, agradezco a la vida, por las oportunidades, los retos y las personas que puso en mi camino.

"El conocimiento es un viaje sin destino final; cada respuesta abre nuevas preguntas, y cada paso adelante invita a seguir aprendiendo."

I. INTRODUCCIÓN

El siglo XXI enfrenta un doble desafío: alimentar una población global que alcanzará cerca de 10 mil millones de habitantes para 2050 (Azqueta, 2007) y gestionar los más de 4 mil millones de toneladas de residuos agrícolas generados anualmente (Mengqi, 2001). En México, este problema es particularmente crítico, ya que se estima se generan alrededor de 45 millones de toneladas de residuos agrícolas al año, de los cuales más de la mitad corresponden tan solo a rastrojos de maíz (SIAP-SAGARPA, 2022). Estos residuos, frecuentemente subutilizados o eliminados mediante prácticas como la quema, contribuyen a procesos como la degradación del suelo, pérdida de biodiversidad y deterioro de la calidad del aire (Varghese, 2023; de Castro *et al.*, 2015).

No obstante, lejos de representar una carga ambiental, estos subproductos agrícolas constituyen una valiosa fuente de biomasa con potencial para generar valor económico, ecológico y social si son gestionados de manera adecuada e innovadora (Molina-Guerrero *et al.*, 2020). Como lo señalan Yassi *et al.*, (2002), su adecuada gestión es clave para avanzar hacia sistemas agrícolas sostenibles. En este sentido, su utilización como alimento y materia prima en la producción de hongos comestibles y medicinales, específicamente hongos con un alto valor agregado como el hongo “melena de león” (*Hericium erinaceus*), pudiese representar una de las alternativas más viables para el aprovechamiento de estos residuos lignocelulósicos.

No obstante, su adopción efectiva requiere más que una evaluación técnica: siendo necesario aplicar metodologías participativas que articulen el conocimiento científico con los saberes locales. En el Altiplano Poblano, las comunidades de Ocoatepec, Pizarro y Chichicuautila con una tradición agrícola y condiciones ambientales similares, aunque con distintas prácticas de manejo de sus rastrojos, constituyen casos ideales para explorar este potencial.

En este sentido el presente proyecto propone un modelo de gestión integral que combina el diagnóstico participativo apoyado en la Investigación-Acción Participativa (IAP) y en el MESMIS como marco de referencia conceptual para la construcción de indicadores, la optimización biológica del cultivo de *H. erinaceus* en rastrojos locales y la caracterización química de los cuerpos fructíferos para validar su calidad nutricional. Al integrar estos componentes el presente trabajo pretende reconocer qué factores económicos, ambientales y sociales influyen en dar viabilidad a una producción sustentable de hongos de importancia

económica y nutricional (*H. erinaceus*) a partir de residuos agrícolas en comunidades rurales (Ocotepéc, Pizarro y Chichicauhtla). Con ello se busca no solo demostrar la viabilidad técnica del cultivo, sino también impulsar una estrategia social pertinente que fortalezca la seguridad alimentaria, promueva el aprendizaje colectivo y contribuya al desarrollo sostenible local. Promoviendo la consolidación de un modelo replicable que contribuya a la transición agroecológica y a la construcción de sistemas alimentarios resilientes.

II. JUSTIFICACIÓN

La inadecuada gestión de los residuos agrícolas constituye una problemática que impacta directamente en la salud ambiental, el equilibrio de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y los procesos de inclusión y equidad social. Esta situación se intensifica en el contexto del cambio climático, donde fenómenos como la escasez hídrica, la degradación del suelo y las sequías recurrentes colocan a los sistemas agro-productivos bajo una presión cada vez mayor. El manejo de los residuos agrícolas y en especial el de los rastrojos influye directamente en la resiliencia de los agroecosistemas y, por ende, en la sostenibilidad a largo plazo de las comunidades que dependen de ellos. En México, la expansión de una agricultura intensiva, frecuentemente asociada con modelos extractivistas y no regenerativos, ha incrementado la generación de residuos agrícolas. Entre ellos, los rastrojos representan una fracción significativa que, en la mayoría de los casos, no recibe un tratamiento adecuado. Las limitaciones técnicas, la falta de infraestructura, los escasos incentivos y los vacíos normativos han resultado en prácticas nocivas como la quema o el abandono, generando efectos negativos sobre el aire, el suelo y los cuerpos de agua.

Como han señalado diversos estudios, los residuos agrícolas podrían dejar de ser considerados desechos si se integran en modelos de valorización sustentable que fortalezcan las economías rurales, la autosuficiencia y la innovación social (Gardi *et al.*, 2014).

Entre los modelos más prometedores destaca el uso de residuos como sustrato para la producción de hongos comestibles. En particular, el hongo *Hericium erinaceus* sobresale por su capacidad para crecer sobre subproductos lignocelulósicos y por sus propiedades nutracéuticas, medicinales y biotecnológicas. Este hongo no solo constituye un alimento

funcional con beneficios para la salud humana como la mejora de funciones neurológicas, la regeneración neuronal y la reducción de procesos inflamatorios, sino que también representa una alternativa de diversificación productiva y generación de ingresos en comunidades rurales. Su cultivo puede realizarse a pequeña escala, con bajo requerimiento tecnológico, lo que permite aprovechar recursos locales, reducir la dependencia de insumos externos y fortalecer la soberanía alimentaria.

En este sentido, la presente investigación propone abordar la problemática del manejo de residuos agrícolas en las comunidades de Ocotepéc, Pizarro, y Chichicuaútlá en el Altiplano Poblano, donde se generan más de 2,500 toneladas de rastrojos anualmente. Se parte de la hipótesis de que es posible transformar los rastrojos generados tras la cosecha en un recurso estratégico para la producción del hongo *Hericium erinaceus*, favoreciendo un enfoque agroecológico que fomenta tanto el desarrollo económico local como la conservación ambiental y la cohesión social.

Teniendo como objetivo revalorizar estos residuos agrícolas (especialmente en contextos críticos como Pizarro, donde se quema hasta el 70% del rastrojo de cebada), el proyecto se apoya en un marco metodológico robusto que articula dos enfoques complementarios: el MESMIS (Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad) como referencia conceptual y la Investigación-Acción Participativa (IAP). Reconociendo a través de estas metodologías la importancia de fomentar la autonomía de las comunidades rurales mediante procesos de que respeten sus ritmos, prioridades y conocimientos tradicionales. Donde la participación activa de los productores locales asegura la permanencia del proyecto, fortalece los lazos comunitarios y facilita el intercambio horizontal de saberes, generando procesos de transformación social a partir de un diálogo entre disciplinas, generaciones y formas de ver el mundo.

De esta manera, el presente estudio ofrece tres contribuciones sustantivas:

1. Científica: amplía el conocimiento sobre la capacidad de distintos residuos agrícolas locales como sustratos para *H. erinaceus*, integrando parámetros productivos, bioquímicos y de sustentabilidad.
2. Social y económica: promueve la valorización de los residuos desde una perspectiva comunitaria, fomentando la organización local, la inclusión de actores sociales y el fortalecimiento de cadenas cortas de valor.

3. Metodológica: propone una adaptación del enfoque MESMIS en combinación con la IAP, generando una herramienta replicable para evaluar prácticas agroecológicas y modelos de producción micológica sostenible en diferentes contextos rurales.

Finalmente, esta investigación adquiere relevancia práctica al ofrecer una alternativa realista para el manejo sostenible de residuos agrícolas en comunidades del Altiplano Poblano. Sus resultados podrán contribuir a diseñar políticas públicas de gestión rural sustentable y a fortalecer las estrategias de transición agroecológica, bajo un modelo de producción que combina innovación científica, apropiación social y conservación ambiental.

Esta interacción entre el conocimiento científico y los saberes locales facilita un diagnóstico compartido y la identificación de soluciones adaptadas al contexto y culturalmente viables. Mediante este enfoque integral, la investigación busca no solo brindar una solución técnica al problema del manejo de residuos agrícolas, sino también consolidar un modelo de producción justo, resiliente y sostenible para el Altiplano Poblano. Se espera que los resultados diversifiquen las alternativas productivas, mejoren la calidad de vida de las familias rurales y sienten las bases para el diseño de políticas públicas replicables en otras regiones con características similares. Finalmente, se busca posicionar a estas comunidades como referentes en el aprovechamiento sostenible de rastrojos con fines alimentarios y biotecnológicos, avanzando hacia una agricultura circular, inclusiva y alineada con los principios del desarrollo sostenible.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 MANEJO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

3.1.1 Generación y problemática de los residuos agrícolas en México

En México, la producción agrícola genera una cantidad significativa de residuos, cuya gestión representa un reto ambiental y social de gran magnitud. De acuerdo con estimaciones de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), cada año se generan aproximadamente 45 millones de toneladas de residuos agrícolas, derivados de cultivos

extensivos como el maíz, el trigo, el sorgo y la caña de azúcar (SADER, 2020). En el Altiplano Poblano, las comunidades de Ocotepéc, Pizarro, y Chichicauhtla contribuyen con más de 2,500 toneladas anuales de estos residuos (1,200 ton de maíz/avena en Ocotepéc, 500 ton de cebada en Pizarro y 800 ton de maíz/frijol/maguey en Chichicauhtla), donde prácticas como la quema del 70% de los rastrojos en Pizarro agravan los problemas ambientales (Diagnóstico Local, 2023).

Los rastrojos agrícolas, particularmente el del maíz, representan el mayor volumen de estos residuos, con más de 25 millones de toneladas anuales, lo que equivale a más del 50% del total de residuos agrícolas generados en el país (INECC, 2018). Esta cifra resulta particularmente relevante considerando que México es el centro de origen del maíz y que su cultivo ocupa más del 30% de la superficie agrícola nacional (SIAP, 2021). En comunidades como Chichicauhtla, donde predomina el cultivo de maíz en sistemas tradicionales de rotación, esta problemática adquiere particular relevancia.

Aunque estos residuos podrían transformarse en bioenergía o fertilizantes orgánicos, el 70% se maneja inadecuadamente (CONAFLOOR, 2019). La quema al aire libre, prohibida por la Ley General de Gestión Integral de Residuos (LGPGIR, DOF, 2022) persiste por la falta de alternativas accesibles para pequeños productores, como es el caso de Pizarro, donde la ausencia de infraestructura adecuada (solo el 46% de cobertura de pavimentación de la región) limita el acceso a tecnologías alternativas (Programa Subregional, 2018). Esta práctica emite anualmente 5.3 millones de toneladas de CO₂eq (SEMARNAT, 2021), además de material particulado (PM_{2.5}) que dispara enfermedades respiratorias en zonas rurales.

No obstante, la degradación de los territorios campesinos vinculada al mal manejo de los rastrojos, como la pérdida de nutrientes, la erosión del suelo y la dependencia de agroquímicos ha contribuido a profundizar las condiciones de desigualdad y vulnerabilidad de los pequeños productores. En el contexto del Altiplano Poblano, esta dinámica es particularmente evidente en comunidades como Ocotepéc, donde a pesar de la disponibilidad de rastrojos, la falta de alternativas sostenibles limita su potencial productivo. Esta situación se traduce en una pérdida de autonomía productiva y en una creciente dependencia de insumos externos, lo que debilita la viabilidad económica de la agricultura familiar (Toledo *et al.*, 2008).

Además, la imposición de modelos agrícolas industriales que priorizan la eficiencia extractiva ha marginado las formas tradicionales de manejo del paisaje y de los residuos agrícolas, basadas en saberes comunitarios, ciclos ecológicos y reciprocidad con la tierra. En Chichicautla, por ejemplo, sistemas tradicionales de rotación de cultivos y aprovechamiento integral de residuos han sido desplazados progresivamente. Esta situación ha resultado en una erosión del conocimiento tradicional campesino, así como en una fragmentación del tejido social, al debilitar prácticas colectivas que históricamente han sustentado la vida rural, como el trabajo comunal, el intercambio de semillas y el aprovechamiento multifuncional de los rastrojos (Escobar, 2012; Toledo, 2013). A esto se suma la falta de acceso a tecnologías apropiadas en comunidades rurales del Altiplano Poblano, lo cual perpetúa un círculo de exclusión y rezago. La falta de políticas públicas integrales y contextualizadas ha provocado que los rastrojos sean vistos como residuos inservibles en lugar de recursos valiosos, lo que reduce las capacidades locales para generar alternativas sustentables basadas en el uso eficiente de sus propios recursos, particularmente en comunidades con alta vocación agrícola como Ocotepéc, Pizarro y Chichicautla.

La gestión de residuos agrícolas, en particular de los rastrojos, no puede abordarse únicamente desde una perspectiva técnica o ambiental, sino que debe comprenderse también como una cuestión de justicia socioambiental, ya que impacta directamente en el derecho de las comunidades a vivir en un entorno sano, productivo y culturalmente significativo. En este sentido, el aprovechamiento sustentable de rastrojos agrícolas puede constituirse en una estrategia integral para fortalecer la sostenibilidad agroecológica en el Altiplano Poblano, promover la salud comunitaria y revalorizar los saberes tradicionales en el marco de una economía circular, especialmente relevante para comunidades con alta producción de residuos como las estudiadas en esta investigación.

3.1.2 Importancia de la gestión apropiada de residuos agrícolas para el desarrollo sostenible

El manejo adecuado de los residuos agrícolas, en particular de los rastrojos, constituye una estrategia clave para avanzar hacia modelos de desarrollo más sostenibles, resilientes y justos, especialmente en contextos rurales como el Altiplano Poblano. En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por la Agenda 2030, este tema se relaciona directamente con el ODS 2 (Hambre Cero), al contribuir a la soberanía alimentaria

y la productividad agroecológica; el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al fomentar el uso eficiente de los recursos y la reducción de residuos; y el ODS 13 (Acción por el clima), al mitigar emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de prácticas como la quema de residuos (ONU, 2015).

Los residuos agrícolas son insumos estratégicos, no desechos, y pueden reincorporarse a los sistemas productivos bajo enfoques de bioeconomía circular y agroecología regenerativa. Esta última va más allá de la agroecología “clásica” al enfatizar no solo la sostenibilidad, sino la activa restauración de los agroecosistemas mediante prácticas como el secuestro de carbono y el diseño de policultivos resilientes (Gliessman, 2018; La Vía Campesina, 2015). Diversas investigaciones han demostrado que el aprovechamiento sustentable de los rastrojos, por ejemplo, como sustratos para la producción de hongos comestibles o insumos para biofertilizantes, mejora la calidad del suelo, incrementa la biodiversidad funcional y reduce la dependencia de agroquímicos (Altieri *et al.*, 2012; FAO, 2019). Además, la reutilización de residuos como parte de un ciclo cerrado de nutrientes permite construir sistemas agrícolas resilientes al cambio climático, con menor impacto ambiental y mayor capacidad de adaptación (Leip *et al.*, 2019).

En los territorios rurales del Altiplano Poblano, esta gestión adquiere una dimensión aún más profunda. La valorización de residuos locales fortalece la autonomía productiva, la diversificación económica y la generación de empleo comunitario, especialmente cuando se articulan cadenas de valor basadas en el aprovechamiento de biomasa residual (Vázquez-Rowe *et al.*, 2016). También, permite recuperar prácticas tradicionales asociadas al uso multifuncional de los rastrojos, como abonos, forraje o material de construcción, lo que atribuye a la revitalización del conocimiento campesino y a la reconstrucción del tejido social (Toledo, 2013; Escobar, 2012). Estos procesos son ejes de la justicia territorial, entendida como el derecho de las comunidades rurales e indígenas a decidir sobre sus recursos y territorios, en contraposición a modelos extractivos que mercantilizan la naturaleza (Porto-Gonçalves, 2017).

La biodiversidad también se ve beneficiada por una gestión sustentable de los residuos, ya que se evita la quema abierta, (como ocurre actualmente con el 70% de rastrojos de cebada en Pizarro) la cual genera emisiones contaminantes y altera los equilibrios ecológicos de ecosistemas cercanos, especialmente en zonas con alta biodiversidad biológica. De acuerdo

con el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD, 2021), prácticas como la quema afectan negativamente a polinizadores, microorganismos del suelo y especies nativas, erosionando los servicios ecosistémicos que sostienen la agricultura misma.

Por otro lado, es indispensable considerar el papel de las políticas públicas en el fomento de prácticas sustentables. Si bien en México existen normas que prohíben la quema de residuos agrícolas (como la NOM-015-SEMARNART/SAGARPA-2007), los incentivos para su aprovechamiento siguen siendo fragmentados, particularmente en comunidades con limitada infraestructura como las del Altiplano Poblano (solo 46% de cobertura de pavimentación en Tepeyahualco, Programa Subregional, 2018). Aunque hay casos exitosos como los biogestores que transforman residuos en energía en Jalisco (SAGARPA, 2020) o las cooperativas de compostaje en Oaxaca (INECC, 2021), estos son la excepción y no la norma. Organismos como la OCDE (2021) han señalado la necesidad de establecer marcos regulatorios y esquemas de subsidios que promuevan la transición hacia energías renovables a partir de la biomasa, el compostaje comunitario, el desarrollo de tecnologías apropiadas para el reciclaje rural. No obstante, críticos como McKay (2021) advierten que la bioeconomía circular, si no está acompañada de regulaciones estrictas, puede reproducir lógicas de mercantilización de la naturaleza, donde los residuos se convierten en “commodities” (mercancías descontextualizadas de su origen socioecológico), perpetuando desigualdades en el acceso a recursos y beneficios (Gómez Baggethun *et al.*, 2020).

Asimismo, es crucial incorporar un enfoque de género en el análisis del manejo de residuos agrícolas. Las mujeres rurales del Altiplano Poblano, pese a enfrentar múltiples desigualdades estructurales, suelen ser protagonistas en iniciativas comunitarias de reciclaje, compostaje, agroecología y economía circular. Según ONU Mujeres (2020), ellas desempeñan un papel fundamental en la gestión sustentable de recursos, en la transmisión de saberes tradicionales y en la construcción de redes de apoyo local. No obstante, muchas veces no son reconocidas en los marcos institucionales ni tienen acceso equitativo a capacitación, financiamiento o propiedad de la tierra. Reconocer su rol y garantizar una participación activa y justa es esencial para cualquier estrategia de sustentabilidad rural.

Esto plantea un desafío mayúsculo: transformar la gestión de residuos agrícolas en un eje de políticas públicas que priorice no solo la eficiencia técnica, sino la reparación histórica de desigualdades socioambientales en los territorios como el Altiplano Poblano, donde

comunidades como Ocoteppec, Pizarro y Chichicauautla tienen el potencial de convertirse en modelos de manejo sustentable.

3.2 HONGOS COMESTIBLES Y MEDICINALES

3.2.1 Importancia de los hongos en sistemas agroecológicos

Los hongos desempeñan un papel fundamental en los sistemas agroecológicos al actuar como organismos clave en la dinámica ecológica del suelo, el reciclaje de nutrientes, y la producción de alimentos y medicinas funcionales. Dentro de los agroecosistemas, los hongos no sólo son una fuente valiosa de nutrición o ingresos, sino también agentes ecológicos esenciales que fortalecen la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas de producción rural. En primer lugar, desde una perspectiva ecológica, los hongos tienen una función crucial como descomponedores primarios, especialmente los hongos saprófitos, que degradan la materia orgánica compleja como celulosa, hemicelulosa y lignina. Esto permite cerrar los ciclos de nutrientes y mantener la fertilidad del suelo sin depender de fertilizantes sintéticos (Stamets, 2005; García-Mendoza *et al.*, 2014). Además, ciertas especies de hongos micorrízicos establecen relaciones simbióticas con raíces de plantas, mejorando la absorción de nutrientes como fósforo y nitrógeno, aumentando la tolerancia a la sequía y promoviendo la salud general de los cultivos (Smith *et al.*, 2008).

Desde una perspectiva agrícola y socioeconómica, el cultivo de hongos comestibles y medicinales representa una alternativa productiva accesible y de bajo costo para pequeños productores, especialmente cuando se integran en sistemas de producción diversificados. Su cultivo no requiere grandes extensiones de tierra y puede realizarse en condiciones controladas a partir de residuos como rastrojo de maíz, paja, bagazo o aserrín, lo cual reduce la generación de residuos y añade valor económico a materiales subutilizados (Royse *et al.*, 2017). Este enfoque es particularmente relevante en zonas rurales donde el acceso a insumos es limitado y donde la valorización de residuos puede representar una fuente de empleo y autonomía económica (Chang & Wasser, 2017). La incorporación de hongos en sistemas agroecológicos también promueve la diversificación productiva, principio fundamental ante crisis climáticas o de mercado (Altieri *et al.*, 2009) Además, muchos hongos, como *H.*

erinaceus, *pleurotus ostreatus* o *Ganoderma lucidum*, tienen propiedades nutraceuticas y medicinales, lo que añade un valor funcional y comercial a su cultivo. Estos hongos han demostrado poseer efectos antioxidantes, antiinflamatorios, inmunomoduladores y neuroprotectores, lo que los posiciona como productos de alto valor agregado en mercados locales e internacionales (Wasser, 2011; Friedman, 2015).

Por otro lado, la producción de hongos se alinea con estrategias de bioeconomía circular, donde los residuos agrícolas son transformados en productos útiles, el sustrato postcultivo puede reutilizarse como composta, alimento animal o mejorador de suelos, cerrando así un ciclo productivo sustentable (Zhang *et al.*, 2014). Este modelo no sólo genera valor económico, sino que contribuye activamente a la reducción del impacto ambiental del sistema agrícola, disminuyendo emisiones, residuos y contaminación.

Desde un enfoque agroecológico integral, el cultivo de hongos puede considerarse una práctica generativa que combina beneficios ecológicos, sociales y económicos. Representa una vía para revalorizar saberes campesinos, empoderar comunidades rurales y construir modelos de desarrollo local sostenibles y culturalmente pertinentes.

Así, los hongos no sólo deben ser vistos como alimento o medicina, sino como elementos estratégicos en la construcción de agroecosistemas resilientes, biodiversos y económicamente viables.

3.2.2 *Hericium erinaceus*: características y propiedades nutraceuticas

TAXONOMIA

Reino: Fungi

División: Basidiomycota

Clase: Agaricomycetes

Orden: Russulales

Familia: Hericiaceae

Género: *Hericium*

Especie: *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers.

Hericium erinaceus (Bull.) Pers., conocido comúnmente como “melena de león” o “hongo erizo”, es una especie perteneciente al reino Fungi, división Basidiomycota, clase

Agaricomycetes, orden Russuales y familia Hericiaceae (de Diego Calonge *et al.*, 2011). Su hábitad natural comprende bosques templados caducifolios y alpinos distribuidos en América, Europa y Asia, donde actúa como saprófito o parásito débil, desarrollándose en madera en descomposición, particularmente de fagáceas como robles (*Quercus* spp.) y hayas (*Fagus* spp.).

La morfología macroscópica de *H. erinaceus* es notablemente distintiva. El carpóforo carece de sombrero y láminas, y se compone de una masa globulosa cubierta por espinas largas, blancas o amarillentas, que pueden alcanzar hasta 5 cm de longitud, asemejando una melena colgante (Statments, 2005). A nivel microscópico, presenta esporas elipsoidales de 5-7 μ m, con superficie lisa o finamente verrugosa, e hifas globulíferas que contienen inclusiones lípidicas (Fig. 1), las cuales facilitan su identificación taxonómica (Kuo, 2020). Su reproducción es sexual mediante basidiosporas, dependiendo de sustratos lignocelulósicos para completar su ciclo de vida (Ginns, 2017), lo cual convierte en un organismo clave para el reciclaje de biomasa vegetal.

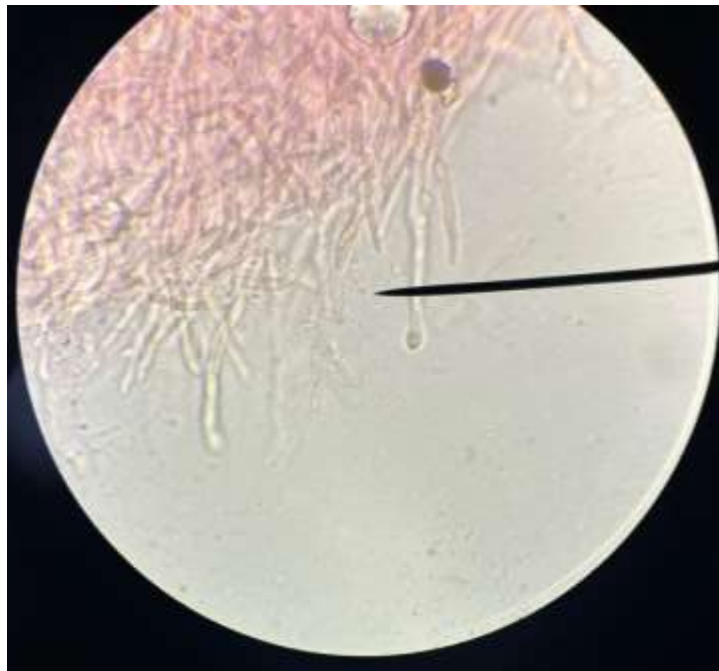


Figura 1. Detalle de la trama hifal del cuerpo fructífero de *Hericium erinaceus* (visto con aumento a 60x bajo tinción de rojo Congo).

Propiedades nutracéuticas y bioactivas

El uso de *H. erinaceus* en la medicina tradicional china se remonta al siglo XVI, destacándose por sus efectos benéficos sobre el sistema digestivo, inmunológico y nervioso (Wu *et al.*, 2022). En las últimas décadas, diversos estudios científicos han demostrado que este hongo posee un amplio espectro de compuestos bioactivos con funciones terapéuticas y nutracéuticas, posicionándolo como un recurso funcional dentro de la biomedicina moderna:

A) Metabolitos bioactivos

Entre los compuestos más relevantes se encuentran los siguientes:

- Polisacáridos (β -glucanos): Tienen funciones inmunomoduladoras, antitumorales y antioxidantes, actuando sobre macrófagos, células NK y linfocitos T, y mejorando la respuesta inmune general (Zhang *et al.*, 2021).
- Hericenonas y erinacinas: Son compuestos terpenoides exclusivos de esta especie, localizados respectivamente en el cuerpo fructífero, y en el micelio, que estimulan la síntesis del factor de crecimiento nervios (NGF), promoviendo la regeneración neuronal (Mori *et al.*, 2008).
- Compuestos fenólicos y antioxidantes: Aportan efectos protectores frente al daño oxidativo celular, neutralizando radicales libres y reduciendo procesos inflamatorios crónicos (Li *et al.*, 2020):

B) Aplicaciones terapéuticas

La evidencia científica recabada en las últimas dos décadas ha permitido demostrar que *H. erinaceus* tiene potencial terapéutico en diversas áreas de la salud:

- Neuroprotección: Estudios clínicos han evidenciado que su consumo mejora la función cognitiva en adultos mayores con deterioro leve, así como en pacientes con enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer Y Parkinson, al reducir la neuroinflamación y estimular la mielinización axonal (Rossi *et al.*, 2023; Phan *et al.*, 2022).
- Salud metabólica: Extractos de hongo han demostrado propiedades antidiabéticas, inhibiendo enzimas como la α -glucosidasa, y reduciendo los niveles de glucosa postprandial. Asimismo, su ingesta ha mostrado un efecto hipolipidémico, disminuyendo los niveles de colesterol LDL y triglicéridos en modelos animales (Khan *et al.*, 2013; Yang *et al.*; 2021).

- Actividad antimicrobiana y cicatrizante: Se ha reportado una actividad antibacteriana significativa contra cepas patógenas como *Helicobacter pylori* y *Staphylococcus aureus*, además de efectos cicatrizantes sobre heridas dérmicas mediante la estimulación de la proliferación de fibroblastos (Shang *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2015).

Vinculación con sistemas agroecológicos y sostenibilidad

Más allá de su relevancia biomédica, *H. erinaceus* representa una herramienta estratégica en la transición hacia sistemas agroecológicos más sostenibles, particularmente en el marco de la economía circular rural. Su capacidad para degradar materia lignocelulósica, presente en residuos agrícolas como la paja de trigo, el bagazo de caña o los rastrojos de maíz, lo convierte en un organismo valioso para el manejo y valorización de estos materiales (Sánchez, 2020); Este proceso no solo evita prácticas contaminantes como la quema, sino que también transforma pasivos ambientales en activos productivos.

En el contexto específico de las comunidades de Ocotepc, Pizarro y Chichicauatla, Puebla, el cultivo de *H. erinaceus* a partir de rastrojos representa una oportunidad estratégica para el fortalecimiento de la economía local, la regeneración del suelo, la reducción de emisiones por quema. De residuos y la revalorización del conocimiento agroecológico campesino. La integración de este hongo en esquemas productivos sustentables puede, por tanto, contribuir tanto a la seguridad alimentaria como a la conservación ecológica de estas regiones del Altiplano Poblano.

3.2.3 Compuestos bioactivos: polisacáridos, nucleósidos, lectinas y otros

Además de los compuestos ya mencionados, *H. erinaceus* contiene una amplia diversidad de metabolitos secundarios y macromoléculas bioactivas que han sido objeto de creciente interés científico por su impacto en la salud humana y su potencial para el desarrollo de productos funcionales y terapéuticos. Entre estos destacan polisacáridos estructuralmente diversos, nucleósidos bioactivos, lectinas fúngicas y otros compuestos como esteroides, terpenoides y compuestos fenólicos, cuyas propiedades biológicas complementan y amplifican las funciones nutraceuticas previamente descritas.

Polisacáridos: diversidad estructural y funcional

Los polisacáridos de alto peso molecular son uno de los principales grupos de compuestos bioactivos presentes en hongos con *Hericium erinaceus*, *Ganoderma lucidum* y *Agaricus blazei* Murrill. Estos polímeros, especialmente los β -glucanos, han sido ampliamente estudiados por su capacidad inmunomoduladora, antioxidante, antiinflamatoria y antitumoral (Chaturvedi *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2014).

En *H. erinaceus*, los β -glucanos son polímeros compuestos por unidades de glucosa unidas principalmente por enlaces $\beta(1\rightarrow3)$ y $\beta(1\rightarrow6)$, los cuales les confieren una estructura tridimensional ramificada crucial para su reconocimiento por receptores específicos del sistema inmune, como Dectina-1 y receptores tipo Toll (TLRs) en células presentadoras de antígenos. Esta interacción desencadena la activación de macrófagos, células NK y linfocitos T, lo cual estimula la producción de citocinas clave, como TNF- α , IFN- γ y óxido nítrico (NO), involucradas en las células tumorales y en la modulación de procesos inflamatorios (Elsayed *et al.*, 2014; Deepalakshmi & Mirunalini, 2011).

Además, se ha demostrado que estos polisacáridos pueden activar rutas intracelulares como la PI3K/AKT, asociadas con la supresión de proliferación celular, lo cual amplía su potencial de prevención y tratamiento de diversos tipos de cáncer (Weng *et al.*, 2010). La eficacia biológica de los polisacáridos depende no solo de su composición química, sino también de su grado de polimerización, masa molecular, patrón de ramificación y enlace glucosídico, factores que determinan su biodisponibilidad y afinidad con receptores celulares (Wachtel-Galor *et al.*, 2011).

La biosíntesis de polisacáridos en hongos como *H. erinaceus* involucra rutas enzimáticas complejas, en las cuales participan glicosiltransferasas y sistemas de membranas del retículo endoplasmático, aparato de Golgi y membrana plasmática. El crecimiento de la cadena polisacárida ocurre principalmente en el extremo no reductor, aunque puede haber modificaciones estructurales post-sintéticas como eterificación o esterificación, que aumentan la complejidad y funcionalidad de los polisacáridos (da Eira *et al.*, 2002).

Nucleósidos: nutrientes condicionales y biomoléculas activas

Los nucleósidos y nucleótidos son componentes estructurales esenciales de los ácidos nucleicos (ADN y ARN), así como precursores de coenzimas y mediadores en procesos

celulares como la síntesis proteica y el metabolismo energético. Aunque el cuerpo humano puede sintetizarlos mediante rutas de *novo* o de reciclaje, en situaciones de alta demanda fisiológica, como infecciones o estrés metabólico, su obtención exógena puede ser crítica, considerándolos nutrientes condicionalmente esenciales (Hu & Yang, 2014).

En este contexto, hongos medicinales como *H. erinaceus*, *Ganoderma* spp., y *Cordyceps* spp., han demostrado contener nucleósidos bioactivos tales como adenosina, uridina, guanosina y xantosina, que además de participar en rutas celulares esenciales, pueden ejercer efectos antiinflamatorios, neuroprotectores e inmunomoduladores (Domínguez-Álvarez *et al.*, 2017). En *H. erinaceus*, la presencia de adenosina y sus derivados ha sido relacionada con la regulación del sistema nervioso y la potencialización del crecimiento neuronal, lo cual favorece su uso en terapias complementarias para trastornos neurológicos y enfermedades degenerativas.

Lectinas: reconocimiento molecular y aplicaciones terapéuticas

Las lectinas son proteínas o glicoproteínas no enzimáticas que se unen de manera específica y reversible a carbohidratos presentes en glicoconjugados y membranas celulares. Esta capacidad de reconocimiento molecular les permite participar en procesos de señalización celular, defensa inmune y regulación del crecimiento celular. (Sharon *et al.*, 2004; Lam *et al.*, 2011).

En *H. erinaceus* se han identificado lectinas con propiedades mitogénicas, antiproliferativas y antitumorales. Estas proteínas inducen apoptosis en líneas celulares cancerosas mediante mecanismos asociados a la activación de caspasas y estrés oxidativo (Kawakami *et al.*, 2013; Thakur *et al.*, 2020). Una de ellas, con afinidad hacia galactosa, ha demostrado actividad contra células de cáncer hepático y colorrectal (Kawakami *et al.*, 2013).

Además, poseen capacidad inmunomoduladora, ya que pueden activar células dendríticas y linfocitos T, promoviendo una respuesta inmune efectiva, lo que les confiere potencial en inmunoterapia contra el cáncer (Lam *et al.*, 2010; Guillot *et al.*, 1997).

Desde una perspectiva agroecológica, la producción de *H. erinaceus* en residuos agrícolas permite obtener compuestos bioactivos como estas lectinas, integrando salud, aprovechamiento de residuos y generación de valor agregado en comunidades rurales del Altiplano Poblano, como Ocotepéc, Pizarro y Chichicuahtla, Puebla.

Erinacinas

Las erinacinas constituyen una familia de compuestos diterpenoides cianatánicos exclusivos del micelio de *H. erinaceus*. Desde su descubrimiento, han atraído gran interés por su potente capacidad de inducir la síntesis del factor nervioso (NGF, por sus siglas en inglés), un neuropéptido esencial para el desarrollo, mantenimiento y reparación de neuronas sensoriales y simpáticas. Esta actividad las convierte en compuestos con alto potencial terapéutico en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer, el Parkinson y la demencia senil.

Hasta la fecha, se han identificado más de 15 tipos de erinacinas, entre las cuales destacan:

- Erinacina A, B y C: Fueron las primeras aisladas y caracterizadas por Kawagishi *et al.*, (1994) a partir de medio líquido. En estudios *in vitro* sobre cultivos de astrocitos murinos, estas moléculas demostraron una capacidad significativa para aumentar los niveles de expresión de NGF, superando incluso a la epinefrina, que se utiliza como compuesto de referencia en estos ensayos. En particular, la erinacina A ha mostrado actividad neurotrófica más potente que otros compuestos naturales conocidos.
- Erinacina E: Fue reportada por Saito *et al.*, (1998) como un compuesto con propiedades analgésicas, derivadas de su acción como agonista selectivo del receptor opioide kappa. A diferencia de los opioides clásicos, la erinacina E produce efectos analgésicos sin provocar dependencia o efectos secundarios severos, abriendo nuevas vías para el desarrollo de analgésicos seguros y eficaces de origen fúngico.
- Erinacina Q: Este compuesto fue identificado por Kenmoku *et al.* (2002) como un precursor central en la biosíntesis de las erinacinas. Mediante estudios de seguimiento con espectroscopia RMN, se logró establecer que la erinacina Q se convierte en erinacina P, la cual a su vez se transforma en erinacina C. Estos resultados no solo permiten comprender las rutas metabólicas involucradas en la síntesis de estos diterpenos, sino que también abren oportunidades para la optimización del cultivo micelial orientado a la producción selectiva de determinados metabolitos.

Diversos estudios han explorado el potencial terapéutico de las erinacina en modelos animales, demostrando no solo efectos neuroprotectores, sino también reducción del estrés

oxidativo, mejoras en la memoria y aprendizaje, así como una disminución en la acumulación de placas beta-amiloide en modelos de enfermedad de Alzheimer.

Hericenonas

Las hericenonas son compuestos aromáticos benzílicos, predominantemente localizados en el cuerpo fructífero de *H. erinaceus*. Al igual que las erinacinas, han demostrado una capacidad importante para estimular la expresión de NGF, pero a través de mecanismos moleculares ligeramente distintos, ya que actúan directamente sobre líneas celulares neuronales diferenciadas.

- Hericenona C, D y H: Estas moléculas fueron aisladas y caracterizadas por Kawagishi *et al.* (1990) y Kawagishi (1991) y demostraron actividad significativa en cultivos celulares de células PC12 (una línea celular derivada de feocromina de rata), promoviendo la diferencia neuronal y el crecimiento de neuritas. Esto sugiere una función importante en la regeneración de conexiones sinápticas, siendo especialmente relevante para procesos de neuroplasticidad.
- Hericenona F: Reportada por Hirokazu *et al.* (1999), esta molécula demostró propiedades antiinflamatorias al inhibir la producción de óxido nítrico (NO) inducido por lipopolisacáridos (LPS) en macrófagos activados. Dado que NO es un medidor clave en procesos inflamatorios crónicos asociados a neurodegeneración, esta actividad convierte a la hericenona F en una molécula de interés dual: neurotrófica y antiinflamatoria.

A diferencia de las erinacinas, cuya producción se limita al micelio, las hericenonas se concentran en el carpóforo, lo cual ha motivado la comparación de ambos órganos del hongo en términos de su capacidad terapéutica. Mientras las erinacinas muestran mayor potencia en la estimulación del NGF, las hericenonas exhiben un espectro más amplio de actividades farmacológicas complementarias, incluyendo la modulación de la respuesta inmune, la inhibición de enzimas proinflamatorias y la protección de células neuronales frente al estrés oxidativo.

3.3 AGROECOLOGÍA, ECONOMÍA CIRCULAR Y BIOECONOMÍA

En el contexto de la transición hacia modelos productivos sostenibles, especialmente en zonas rurales, la agroecología, la economía circular y la bioeconomía se presentan como enfoques interrelacionados que buscan reducir el impacto ambiental, aprovechar eficientemente los recursos y fomentar sistemas alimentarios resilientes. Cada uno de estos enfoques aporta principios complementarios que, integrados, permiten transformar los residuos agrícolas en recursos útiles, como el caso del cultivo de hongos comestibles.

La agroecología se concibe como un modelo sustentable que integra principios ecológicos en el diseño y gestión de agroecosistemas. Más allá de una técnica agrícola, se trata de un enfoque transdisciplinario que considera el conocimiento campesino, la soberanía alimentaria y la resiliencia ecológica como elementos centrales. Este modelo resulta especialmente pertinente en contextos rurales, donde las comunidades dependen de la producción agrícola tanto para su subsistencia como para su desarrollo económico.

La economía circular, por su parte, es una estrategia que busca cerrar los ciclos de materiales mediante la reducción, reutilización, reciclaje y valorización de los residuos. En contraste con el modelo lineal tradicional, (extraer, producir y desechar), la economía circular fomenta el aprovechamiento integral de los recursos disponibles, disminuyendo la presión sobre el ambiente. En su aplicación a sistemas biológicos, la economía circular promueve la valorización de subproductos agrícolas como cáscaras, bagazo, rastrojo y paja, mediante procesos como el compostaje, la generación de bioenergía, la alimentación animal o la producción de hongos comestibles.

La bioeconomía complementa este enfoque al proponer un modelo económico basado en el uso eficiente de recursos biológicos renovables, (como la biomasa agrícola) para generar alimentos, energía, biofertilizantes, materiales biodegradables y productos de alto valor añadido. A diferencia de una visión exclusivamente agroindustrial, la bioeconomía actual se apoya en procesos biotecnológicos avanzados y en la biodiversidad como fuente de innovación. Además, se orienta a sustituir recursos fósiles, reducir emisiones y generar empleo local.

Cuando estos tres enfoques convergen, surge la bioeconomía circular, un modelo que propone mantener los flujos de biomasa en uso el mayor tiempo posible, transformando residuos en productos útiles, a través de prácticas regenerativas y tecnologías limpias.

En este marco, una de las aplicaciones más prometedoras es el cultivo de hongos comestibles en sustratos derivados de residuos agrícolas, como los rastrojos de maíz, paja de trigo, bagazo de caña, cascarilla de arroz, residuos de sorgo, café y otros cultivos regionales.

Este tipo de valorización ofrece múltiples ventajas técnicas, económicas y ambientales, en comparación con otras formas de tratamiento de residuos. Por ejemplo:

- A nivel técnico, los residuos lignocelulósicos mencionados, poseen una estructura adecuada para el desarrollo del micelio, lo que permite su uso como sustrato eficiente para especies como *Pleurotus ostreatus* o *H. erinaceus*.
- En términos económicos, uso, reduce costos de producción y permite generar alimentos de alto, valor nutricional a bajo costo.
- Desde la perspectiva ambiental, se evita la quema de residuos, se reducen emisiones de gases contaminantes y se promueve la regeneración del suelo mediante la reutilización de subproductos locales.

Además, este tipo de innovación productiva contribuye a alcanzar los objetivos globales como el ODS 2 hambre cero, al generar una fuente accesible de proteínas y el ODS 12, producción y consumo responsable al fomentar el aprovechamiento de recursos y la minimización de desperdicios.

En este sentido, promover la producción de hongos comestibles en zona rurales, mediante la valorización de residuos agrícolas, no sólo representa una alternativa sostenible y circular, sino que también se configura como una estrategia de desarrollo local, capaz de fortalecer la seguridad alimentaria dinamizar economías campesinas y contribuir a la conservación ambiental.

3.4 TRANSICIÓN AGROECOLÓGICA Y SOBERANÍA ALIMENTARIA

La transacción agroecológica es un proceso gradual y multidimensional que busca transformar los sistemas agroalimentarios dominantes (dependientes de insumos externos, combustibles fósiles y monocultivos), hacia modelos de producción más sustentables, resilientes y socialmente justos. Este proceso implica abandonar progresivamente prácticas convencionales que degradan el ambiente y precarizan al campesinado, para avanzar hacia

agroecosistemas diversificados que se basen en principios ecológicos como el reciclaje de nutrientes, el manejo integrado de la biodiversidad, la soberanía del conocimiento y la valorización de saberes locales (Altieri & Toledo, 2011; Wezel *et al.*, 2009).

Esta transición no ocurre de forma lineal ni automática; suele atravesar diversas etapas que van desde ajustes técnicos aislados (como remplazar fertilizantes químicos por abonos orgánicos), pasando por el rediseño de las interacciones ecológicas en la parcela, hasta alcanzar su transformación más profunda del paradigma productivo, en donde también cambian las relaciones sociales y territoriales (Nicholls *et al.*, 2016). Sin embargo, este camino enfrenta múltiples obstáculos: la dependencia estructural a agroquímicos, la falta de acceso a mercados alternativos, el debilitamiento de las estructuras comunitarias y la escasa presencia de políticas públicas que impulsen un enfoque agroecológico (Rosset & Altieri, 2017).

En este contexto, la soberanía alimentaria emerge como una propuesta política y ética que fortalece el horizonte transformador de la agroecología. Definida como el derecho de los pueblos a definir sus propias políticas y estrategias de producción, distribución y consumo de alimentos, la soberanía alimentaria propone que la agricultura debe responder primero a las necesidades locales, promover el control comunitario sobre los bienes comunes, garantizar el acceso a alimentos culturalmente apropiados y valorar el papel fundamental de las mujeres y los pueblos en defensa de los territorios (Vía Campesina, 2003).

Este proyecto de tesis se sitúa en la intersección concreta entre transición agroecológica y soberanía alimentaria, al proponer el manejo agroecológico de rastrojos agrícolas para la producción local de *H. erinaceus* en las comunidades de Ocotepc, Pizarro y Chichicauatla. En este sentido, el aprovechamiento de residuos agrícolas (como los rastrojos generados tras la cosecha), para el cultivo de hongos comestibles constituye una estrategia que articula la innovación técnica con las condiciones y recursos locales del territorio. Esta práctica transforma un residuo subutilizado en un producto alimenticio de alto valor nutricional y económico, promoviendo una forma de producción más sustentable y rentable.

Además de evitar prácticas comunes pero contaminantes como la quema de residuos, esta propuesta contribuye a cerrar ciclos ecológicos, reincorporando materia orgánica al sistema productivo de manera eficiente. Al mismo tiempo, fomenta la diversificación agropecuaria, fortalece la autonomía campesina y genera nuevas oportunidades económicas y alimentarias

para los productores de estas comunidades. La técnica es tecnológicamente accesible, adaptable a diferentes escalas y compatible con los saberes locales, lo que favorece su apropiación por parte de los productores.

De este modo, el cultivo de *H. erinaceus* a partir de rastrojos no solo representa una alternativa técnica viable, sino también una herramienta poderosa para avanzar hacia sistemas alimentarios más justos, resilientes y enraizados en las capacidades de los territorios campesinos del Altiplano Poblano. Su implementación aporta a una transición agroecológica situada, donde el manejo sustentable de los recursos y la generación de valor se alinean con los principios de soberanía alimentaria.

3.5 EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

3.5.1 Enfoque sistémico

El enfoque sistémico es una perspectiva interdisciplinaria que ofrece un marco metodológico para el análisis de sistemas integrados, como los agroecosistemas, destacando la importancia de las interacciones entre sus componentes. A diferencia de las aproximaciones reduccionistas, este enfoque parte de la premisa de que las relaciones entre los elementos del sistema son tan relevantes como los elementos mismos, y que las interacciones subsistémicas constituyen la unidad básica de análisis (Reátegui, 2019).

Desde esta visión, el pensamiento sistémico promueve la comprensión de los fenómenos complejos mediante un lenguaje común entre disciplinas científicas, facilitando su análisis integral; se vale de herramientas como las matemáticas, los modelos gráficos y los sistemas de información, que no solo permiten sintetizar la realidad compleja, sino también mejorar la comunicación interdisciplinaria y la toma de decisiones (Reátegui, 2019).

Este enfoque responde a la necesidad de abordar la crisis ambiental desde su complejidad e interconexión, comprendiendo que los desafíos ecológicos están profundamente vinculados con dimensiones humanas como la cultura, la tecnología y las ciencias sociales. Así, frente a la fragmentación del conocimiento académico y la insuficiencia de enfoques disciplinarios tradicionales para enfrentar problemas multifactoriales, el enfoque sistémico aboga por la

integración de saberes, el diálogo de conocimientos y la construcción de alternativas que permitan transformar las relaciones entre sociedad y naturaleza (Leff, 2007).

En el contexto de los sistemas agroecológicos, esta perspectiva permite analizar la unidad de producción como un sistema dinámico en el que interactúan cultivos, suelos, agua, biodiversidad, personas, saberes locales y relaciones sociopolíticas. Desde esta visión integral, se reconocen que decisiones aparentemente técnicas (como el manejo de residuos agrícolas) tienen implicaciones ecológicas (ej. Diversificación e independencia de insumos externos) (Altieri *et al.*, 2000; Nicholls *et al.*, 2016).

Esta complejidad justifica la necesidad de una evaluación multivariable de la sustentabilidad, basada en indicadores que abarquen las dimensiones ambiental, social y económica. En esta tesis, la construcción de dichos indicadores se apoyó en el MESMIS como marco metodológico de referencia, lo que permitió orientar la selección de atributos clave como productividad, estabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autogestión (Masera *et al.*, 1999; Astier *et al.*, 2008). No obstante, el MESMIS no se aplicó en su totalidad, sino que funcionó como guía conceptual para el diseño de los 14 indicadores utilizados en las comunidades de estudio.

3.5.2 Indicadores, criterios y dimensiones de análisis

La evaluación de la sustentabilidad de agroecosistemas requiere del uso de indicadores como herramientas metodológicas que permiten traducir principios abstractos en variables observables y medibles. Estos indicadores, definidos en función de criterios específicos, hacen posible identificar tendencias, comparar sistemas y apoyar procesos de toma de decisiones orientadas a mejorar el desempeño sustentable de las unidades de producción (Masera *et al.*, 1999).

Los indicadores de sustentabilidad pueden ser cuantitativos, cualitativos, o compuestos, y permiten operacionalizar atributos clave de los sistemas agroecológicos, como productividad, estabilidad, confiabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad, autosuficiencia, y autonomía (Ortiz, 2017; Masera *et al.*, 1999). Cada uno de estos atributos corresponde a una dimensión esencial de la sustentabilidad (económica, ambiental o social) y está vinculado a criterios analíticos que orientan la elección de indicadores relevantes y contextualizados.

El diseño de indicadores, especialmente de marcos participativos como MESMIS, debe considerar tanto la pertinencia técnica como la apropiación local del proceso. Es decir, los indicadores deben surgir de un diálogo entre conocimientos técnicos y saberes campesinos, de modo que reflejen las prioridades, capacidades y condiciones específicas del territorio evaluado. Asimismo, deben establecerse escalas de medición claras, definiciones operativas consistentes y mecanismos para su monitoreo a lo largo del tiempo (Masera *et al.*, 1999).

En este sentido, la definición de indicadores para esta investigación se apoyó en marcos metodológicos consolidados. Particularmente, el enfoque MESMIS proporcionó una base conceptual valiosa, al resaltar la importancia de integrar dimensiones sociales, económicas y ambientales en la evaluación de los sistemas agroecológicos. Aunque la metodología no fue aplicada en su totalidad, sus principios fueron adaptados al contexto de las comunidades de Ocoteppec, Pizarro y Chichicuautila.

3.6 MESMIS COMO MARCO DE REFERENCIA EN LA CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES

El Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS) es una herramienta metodológica diseñada para evaluar la sustentabilidad de agroecosistemas desde un enfoque integral, participativo y adaptativo. Esta metodología se fundamenta en el análisis de tres dimensiones esenciales (ambiental, social y económica) y en la valorización de atributos clave como productividad, estabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autogestión (Masera *et al.*, 1999; Astier *et al.*, 2008).

El MESMIS propone un proceso estructurado en seis etapas: (1) caracterización de sistema, (2) identificación de puntos críticos, (3) selección de indicadores, (4) medición y monitoreo, (5) análisis e integración de resultados y (6) conclusiones y recomendaciones. Su carácter participativo y flexible permite adaptar los indicadores a las particularidades de cada territorio y comunidad, lo que lo ha consolidado como una de las metodologías más empleadas en la evaluación de la sustentabilidad de agroecosistemas campesinos y comunitarios en América Latina (Speelman *et al.*, 2007).

En la presente investigación, el MESMIS no se aplicó de manera íntegra, sino que funcionó como marco de referencia conceptual y metodológico para la construcción de los 14 indicadores utilizados. A partir de los principios de integralidad, multidimensionalidad y participación que plantea esta metodología, se adaptaron indicadores específicos a las comunidades de Ocotepc, Pizarro y Chichicautla, considerando sus contextos productivos, sociales y ambientales.

3.6.1 MESMIS como referencia para la construcción y aplicación de indicadores

En esta investigación, el MESMIS se utilizó como guía conceptual para diseñar los indicadores de sustentabilidad aplicados en las comunidades de estudio. Sus principios orientaron la identificación de prácticas relacionadas con el manejo de rastrojo, las cuales se analizaron en función de las tres dimensiones de la sustentabilidad: ambiental, social y económica.

Con base en un diagnóstico participativo, se definieron 14 indicadores adaptados a las condiciones locales de las comunidades de Ocotepc, Pizarro y Chichicautla.

3.6.2 Importancia de los indicadores sustentables.

Los indicadores de sustentabilidad desempeñan un papel fundamental en la evaluación de sistemas complejos, ya que permiten traducir fenómenos sociales, ecológicos y económicos en datos observables, comparables y útiles para la toma de decisiones. En el contexto de esta investigación, los indicadores seleccionados proporcionaron una base sólida para analizar los efectos del manejo de rastrojos en la producción de *H. erinaceus*, así como para identificar las ventajas comparativas de los sistemas agroecológicos frente a los convencionales.

En la dimensión ambiental, por ejemplo, el indicador “no quema de rastrojos” permitió evidenciar la implementación de prácticas de menor impacto ecológico entre los productores agroecológicos. En la dimensión económica, el uso de rastrojo como insumo para la elaboración de productos de valor agregado (como compostas o bioles) mostró un potencial significativo para diversificar ingresos. Por su parte, en la dimensión social, indicadores como el intercambio de saberes y la cohesión comunitaria destacaron la importancia de los vínculos sociales como componentes clave de la sustentabilidad (Sarandón & Flores, 2009).

Los indicadores utilizados no solo sirvieron para medir condiciones actuales, sino también para identificar tendencias y formular recomendaciones orientadas a la mejora continua. Asimismo, favorecieron la reflexión colectiva y la generación de conocimiento compartido, elementos fundamentales en los procesos de transición agroecológica (Nicholls *et al.*, 2016). Su construcción e implementación respondieron a criterios de pertenencia local, viabilidad técnica y utilidad para la toma de decisiones en el ámbito comunitario.

En conjunto, el marco MESMIS sirvió como una base metodológica que permitió identificar y analizar dinámicas diferenciadas de sustentabilidad entre los productores. A través de sus principios, se visibilizó el papel estratégico del manejo de rastrojos no solo como una práctica agrícola, sino como una herramienta integral para la conservación de suelos, la mejora de la economía local y el fortalecimiento de las relaciones sociales en las comunidades.

3.7 INVESTIGACIÓN DE ACCIÓN PARTICIPATIVA

La Investigación de Acción Participativa (IAP) constituye una herramienta metodológica valiosa en la construcción de conocimiento colectivo, al integrar saberes científicos y populares con el objetivo de transformar la realidad social. Este enfoque se fundamenta en la interacción reflexiva entre diversos actores, promoviendo procesos dialógicos, de aprendizaje mutuo y empoderamiento sociopolítico, especialmente en contextos de marginación o exclusión (Hall, 1983). A diferencia de otras metodologías investigativas la IAP estimula la participación, la autodeterminación y la capacidad organizativa de las comunidades, colocándolas como protagonistas de su propio desarrollo.

Desde esta perspectiva, el conocimiento no concibe como una herramienta exclusiva del investigador, sino como un producto colectivo que emerge del intercambio de experiencias y saberes locales. En consonancia con Freire (1970), la IAP se fundamenta en una comunicación horizontal y recíproca, donde los sujetos no son objetos de estudio, sino participantes activos en la construcción de significados, conocimientos y propuestas transformadoras.

3.7.1 Enfoque colaborativo y rol de los actores locales

La IAP parte de un enfoque colaborativo en el cual los actores locales desempeñan un papel central tanto en la identificación de problemas como en la formulación de soluciones. De acuerdo con Gallego (2007), esta metodología tiene un doble propósito; intervenir en una realidad específica a través de la acción y al mismo tiempo, generar conocimiento sobre dicha intervención. En este sentido, los resultados de una investigación que emplea el enfoque IAP es el nivel de participación comunitaria, el cual varía en función del contexto, los objetos de la investigación y las capacidades del facilitador o investigador. Geilfus (2009) propone una tipología de siete niveles de participación, que permiten valorar el grado de involucramiento de las comunidades:

1. Participación pasiva, donde no hay intervención en decisiones ni en la implementación del proyecto;
2. Suministro de información, limitado a la respuesta de encuestas o entrevistas sin capacidad de incidencia;
3. Consulta, en la que se escuchan opiniones sin asegurar su incorporación en las decisiones;
4. Participación por incentivos, en la cual se involucra a los participantes a cambio de beneficios externos;
5. Participación funcional, con la formación de grupos para fines específicos previamente definidos;
6. Participación interactiva, donde los actores locales se organizan y colaboran activamente en las decisiones del proyecto; y
7. Autodesarrollo, nivel más alto de participación en el que las comunidades asumen completamente la iniciativa y dirección de las acciones, contando únicamente con asesoría externa.

Este enfoque resulta especialmente relevante en contextos latinoamericanos y mexicanos, donde las problemáticas ambientales y sociales vinculadas a la agricultura requieren soluciones integrales construidas de forma colectiva. En investigaciones sobre agroecosistemas, como la presente, la IAP contribuye a integrar los conocimientos campesinos, las prácticas agroecológicas y los marcos científicos de evaluación.

3.7.2 Herramientas participativas y su relación con el enfoque MESMIS

Para garantizar el carácter participativo de esta investigación, se emplearon diversas herramientas metodológicas que facilitaron la expresión colectiva y el análisis compartido. Entre estas se incluyeron dinámicas de grupo, entrevistas abiertas y observación de campo. Estas herramientas no solo permitieron recoger información relevante, sino también estimular la reflexión crítica, el diálogo y la toma de decisiones por parte de los actores locales.

Asimismo, la Investigación-Acción Participativa (IAP) se articuló de manera complementaria con el enfoque MESMIS, el cual no se aplicó en su totalidad, pero sirvió como referencia conceptual para la identificación de puntos críticos, así como para la construcción y ponderación de indicadores de sustentabilidad. Esta integración metodológica permitió generar un análisis más conceptualizado y legítimo, basado en los valores, percepciones y prioridades de los propios productores.

IV. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se abordó bajo un enfoque sistémico y holístico, considerando los agroecosistemas como sistemas complejos que interactúan factores sociales, ambientales y económicos. Se integraron metodologías basadas en la Investigación de Acción-Participativa (IAP) y el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS).

Si bien el MESMIS no se aplicó en su totalidad, su estructura conceptual y sus principios orientadores sirvieron como base metodológica para la formulación de los indicadores de sustentabilidad y para el análisis integral de la gestión de residuos agrícolas, así como de su potencial en la producción de hongos comestibles del género *H. erinaceus*. La combinación de IAP y el enfoque MESMIS permitió vincular la participación activa de los productores

con una perspectiva sistémica de sustentabilidad, fortaleciendo la pertinencia y legitimidad de los resultados obtenidos

Este enfoque facilitó la comprensión integral del territorio, reconociendo las interdependencias entre las prácticas locales, el uso de recursos naturales y la sostenibilidad productiva. La participación activa de las comunidades de Ocotepéc, Pizarro y Chichicauhtla, ubicadas en la subregión agrícola de Puebla, resultó fundamental para identificar oportunidades reales de aprovechamiento de los rastrojos como sustrato para la producción de hongos.

La producción de *H. erinaceus* se abordó no solo como una alternativa económica, sino como una estrategia de desarrollo sustentable vinculada al manejo agroecológico de residuos de cosecha. De esta forma, se busca contribuir al fortalecimiento de los medios rurales mediante una propuesta que promueva la resiliencia agro-ecosistémica y el bienestar comunitario.

4.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué factores económicos, ambientales, sociales influyen en la viabilidad de una producción sustentable de hongos comestibles *H. erinaceus* a partir de residuos agrícolas en las comunidades de Ocotepéc, Pizarro, Chichicauhtla, Puebla?

V. HIPÓTESIS

Las comunidades de Ocotepéc, Pizarro y Chichicauhtla presentan condiciones sociales, productivas y ecológicas favorables para establecer un modelo de producción sustentable de *H. erinaceus*, esto basado en el aprovechamiento de residuos agrícolas de cosecha como sustrato, siempre que se integren prácticas participativas y enfoques agroecológicos

VI. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los factores sociales, ambientales y biológicos involucrados en la producción sustentable de *H. erinaceus* en las comunidades de Ocotepc, Pizarro y Chichicuatla, Puebla.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar y aplicar un diagnóstico participativo y sistémico para evaluar la sustentabilidad en los agroecosistemas de los productores, mediante la integración de los enfoques MESMIS e IAP, además de herramientas de análisis multicriterio, considerando al MESMIS como base metodológica para la formulación de los indicadores.
2. Evaluar la eficiencia biológica, tasa de producción y tasa de biodegradación de los cuerpos fructíferos del hongo *H. erinaceus* cultivado sobre distintos residuos agrícolas de cosecha en las comunidades seleccionadas.
3. Obtener la caracterización química de los compuestos presentes en los cuerpos fructíferos de *H. erinaceus* provenientes de los diferentes residuos de la región.

VII. MATERIALES Y METODOS

7.1 ZONA DE ESTUDIO: OCOTEPEC, PIZARRO Y CHICHICUAUTLA, PUEBLA.

El presente estudio se llevó a cabo en tres comunidades rurales del estado de Puebla (Ocotepc, Pizarro y Chichicuatla), ubicadas en el sector oriental del Altiplano Poblano (correspondiente a la provincia fisiográfica Altiplano Sur (INEGI, 2017) específicamente en la región centro–oriental del país: Juan Sarabia Pizarro (conocida localmente como Pizarro)

y Chichicuautila, pertenecientes al municipio de Tepeyahualco y Ocoatepec, cabecera municipal del municipio homónimo (Fig. 2).

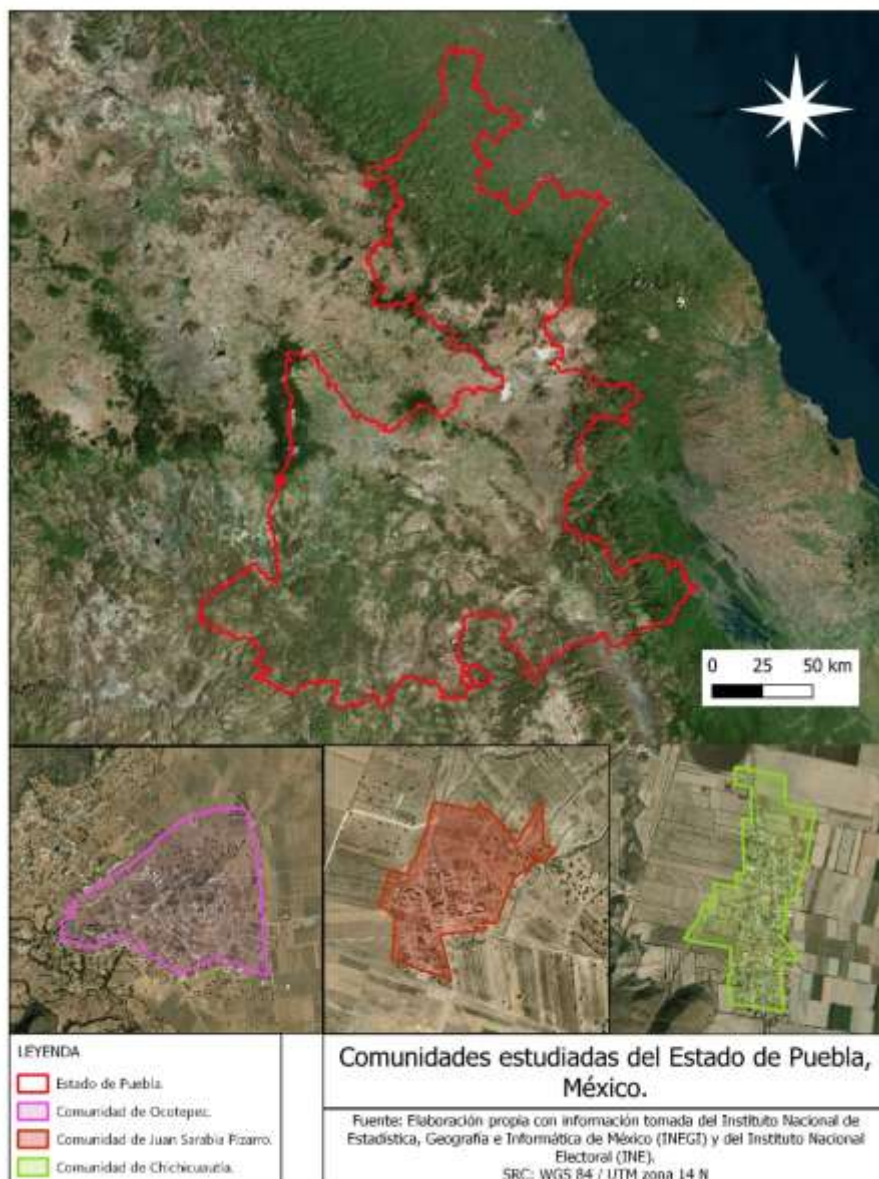


Figura 2. Comunidades estudiadas del estado de Puebla, México. Delimitación del estado y ubicación de las comunidades de Ocoatepec, Juan Sarabia Pizarro y Chichicuautila. *Elaboración propia con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y del Instituto Nacional Electoral (INE).

Esta región biogeográfica, caracterizada por su altitud promedio 2,330-2,400 msnm (Gobierno del Estado de Puebla, 2018) y clima templado subhúmedo (Cb(w2)) con lluvias en verano (García, 2004), forma parte del corrector bioclimático templado subhúmedo de la

altiplanicie poblana (INEGI, 2020). Los valles intermontanos con suelos Feozem háplico y Vertisol pélico (INEGI, 2017) albergan sistemas agropecuarios tradicionales donde el 78% de la superficie cultivable se dedica a maíz y cebada (SAGARPA, 2017).

La subregión abarca una superficie de 96,412.49 hectáreas, delimitada entre los 19°21' y 19°42' de latitud norte y los 97°32' y 97°21' de longitud oeste (Gobierno de Puebla, 2018a). Esta área se distingue por su homogeneidad en términos de desarrollo físico, económico y ambiental, con marcada vocación hacia la agricultura de temporal y ganadera extensiva (SAGARPA, 2017). Su posición geográfica la configura como zona de transición ecológica entre el Eje Neovolcánico (oeste) y la Sierra Norte de Puebla (este), patrones documentados en el Programa de Ordenamiento Ecológico Regional (Gobierno de Puebla, 2018).

Administrativamente, Ocotepc limita al norte y este con Cuyuaco, al sur con Libres y al oeste con Ixtacamaxitlán (INEGI, 2020).

Juan Sarabia Pizarro se localiza a 2,330 metros sobre el nivel del mar (msnm) y alberga una población aproximada de 607 habitantes (Gobierno del Estado de Puebla, 2018). Su perfil productivo está definido por su inclusión en un corredor agropecuario y forestal, donde predominan sistemas de cultivos tradicionales con escasa mecanización (Turrent *et al.*, 2012). Por su parte, Chichicauatla, a 2,337 msnm y con 2,316 habitantes (Gobierno del Estado de Puebla, 2018b), presenta condiciones socioeconómicas similares, basadas en una estructura familiar de producción agrícola y uso predominante de suelos de temporal (Appendini, 2014).

El municipio de Ocotepc, ubicado en la porción centro-norte de Puebla (entre 19°33'00" y 19°39'42" de latitud norte y 97°00'00" de longitud oeste), destaca por su fuerte orientación hacia el cultivo de maíz de temporal, actividad que constituye el eje de su economía local (Ortega *et al.*, 2016). La región enfrenta desafíos como variabilidad climática, degradación de suelos y falta de infraestructura para valor agregado (SEMARNART, 2019), factores que limitan su desarrollo y perpetúan ciclos de subsistencia (CONEVAL, 2020).

7.1.1 Contexto agrícola y manejo de residuos

El sistema agrícola en estas comunidades se caracteriza por su dependencia del temporal y prácticas tradicionales con mínima tecnificación. Estudios previos estiman que más del 42%

de la población económicamente activa se dedica a actividades agropecuarias económicamente activa se dedica a actividades agropecuarias (Gobierno del Estado de Puebla, 2018), con una marcada tendencia al monocultivo de maíz que ocupa el 75% de la superficie cultivada (SAGARPA, 2017). La agricultura está sujeta a una marcada estacionalidad, con siembras entre mayo-junio y cosechas de septiembre a noviembre, generando anualmente aproximadamente 5-7 toneladas de rastrojo por hectárea que podrían ser aprovechados (Turrent *et al.*, 2012).

El manejo de residuos agrícolas es ineficiente: la quema de rastrojos prevalece como método de limpieza en más del 70% de las parcelas (Gobierno del Estado de Puebla, 2018), pese a sus impactos negativos en la fertilidad del suelo, donde se estima una pérdida de 12kg de nitrógeno por tonelada quemada (IPCC, 2006). Esta práctica, aunque funcional para el control de plagas, ha reducido el contenido de materia orgánica del suelo a menos 1.5% en áreas críticas (SEMARNAT, 2019). Alternativas como el compostaje o su uso como sustrato para micocultivos son incipientes y solo se aplican en el 5% de las unidades productivas, principalmente por falta de capacitación y acceso a tecnologías apropiadas (Martínez-Barrera *et al.*, 2018).

7.1.2 Tipos de cultivos predominantes y estacionalidad

La producción agrícola en la región se caracteriza por su baja diversificación y adaptación a las condiciones de temporal. Estudios recientes documentan que el maíz criollo representa el 75% de la superficie cultivada, seguido por la cebada (15%) y el frijol (5%), conformando un sistema de policultivo tradicional (Ortega *et al.*, 2016). Los ciclos productivos están estrictamente determinados por la temporada de lluvias, con siembras concentradas en mayo-junio y cosechas entre septiembre y noviembre, lo que genera una ventana crítica de disponibilidad de residuos agrícolas entre octubre y diciembre (Sánchez-Cohen *et al.*, 2015). La estacionalidad impone importantes limitantes: durante la canícula (julio-agosto), los cultivos enfrentan estrés hídrico que reduce los rendimientos en un 20-30%, particularmente en variedades de ciclo largo (Juarez *et al.*, 2020). Esta variabilidad climática, combinada con prácticas de manejo inadecuadas, ha provocado que hasta el 15% de las parcelas sean abandonadas temporalmente en años particularmente secos (INIFAP, 2021). Los residuos

generados, principalmente rastrojo de maíz con un contenido de 55-60% de celulosa, representan un recurso subutilizado con potencial para procesos de bioeconomía circular (González-López *et al.*, 2020).

7.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 1.

Para el diagnóstico y evaluación de la sustentabilidad de los agroecosistemas locales vinculados al manejo de rastrojos, se empleó una metodología de análisis participativa y sistémica, basada en los enfoques de Sarandón y Flores (2009), y Geilfus (2009), con un sustento teórico en los marcos conceptuales de Foladori (2002), Giannuzzo (2010) y Ortiz *et al.*, (2017). Mientras que el concepto de sustentabilidad empleado se entendió como una propiedad compleja, dinámica y multidimensional, que articula dimensiones ambientales, sociales y económicas en busca de satisfacer las necesidades humanas y ecosistémicas presentes y futuras.

7.2.1 Dimensiones de análisis

Como herramienta metodológica, se utilizó el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), desarrollado por Masera *et al.* (1999). Este marco orientó la valoración de los agroecosistemas locales como unidades integrales de producción en las que convergen subsistemas agrícolas, sociales y ecológicos.

La investigación tomó como base los siete atributos de la sustentabilidad propuesto por Masera *et al.*, (1999), ampliamente utilizados en la literatura especializada (Ortiz *et al.*, 2017): (1) Productividad, (2) Estabilidad, (3) Confiabilidad, (4) Resiliencia, (5) Adaptabilidad, (6) Autogestión y (7) Equidad.

Estos atributos sirvieron como marco conceptual para la definición de criterios e indicadores adaptados al contexto local, los cuales permitieron evaluar los niveles de sustentabilidad alcanzados por los productores.

7.2.2 Levantamiento de la información

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI (2020), las localidades registran alrededor de 8 mil habitantes, siendo Ocotepéc la de mayor población. El tamaño de muestra se determinó con base en la fórmula de población finita (Leal et al. 2025):

$$n = Z^2 \times p \times q \times N / E^2 (N-1) + Z^2 \times p \times q$$

Donde:

n = tamaño de la muestra,

Z = nivel de confianza,

p = proporción estimada (variabilidad positiva),

q = 1 - p (variabilidad negativa),

N = población total (aproximadamente 8,000 habitantes en conjunto), y

E = precisión del error.

El ajuste de estos parámetros permitió obtener una muestra operativa de 61 entrevistados, representativa de las dinámicas socio-productivas de la región, distribuidas de la siguiente manera: Pizarro (17), Chichicauautla (13) y Ocotepéc (31).

La información primaria se recopiló mediante un enfoque de investigación-acción participativa (IAP) Chambers (2015) promoviendo la implicación directa de las y los productores en el proceso evaluativo

Las técnicas empleadas fueron:

- Entrevistas semiestructuradas a productores rurales de las comunidades de Ocotepéc, Pizarro y Chichicauautla.
- Aplicación de 32 preguntas abiertas orientadas a las tres dimensiones de la sustentabilidad.
- Observación de campo, registros fotográficos y talleres participativos, para complementar la comprensión cualitativa del sistema productivo

7.2.3 Construcción de indicadores e instrumentos de medición

La selección de 14 indicadores operativos se realizó a partir de los atributos de sustentabilidad, criterios contextuales locales y un proceso participativo, reforzado mediante

herramientas de análisis multicriterio (Ananda & Herath, 2009; Belton & Stewart, 2002) y la jerarquización de criterios (Saaty, 1987).

Cada indicador fue vinculado a preguntas específicas del instrumento de entrevista, y fue ponderado en función de su relevancia agroecológica, su impacto en la sustentabilidad y su posibilidad de ser medido en campo.

Los datos cualitativos fueron transformados en datos ordinales utilizando una escala de tres niveles:

- 1: El indicador no está presente o se contradice en la práctica del productor
- 2: El indicador está presente parcialmente o de forma incipiente.
- 3: El indicador está plenamente incorporando en la práctica productiva.

A diferencia de enfoques comparativos, este análisis se centró en identificar las características generales del sistema de producción local, sin contrastar grupos específicos. Esto permitió construir un panorama integral de las condiciones de sustentabilidad que prevalecen en el territorio.

7.2.4 Dimensiones e indicadores evaluados

Dimensión económica

Para esta dimensión se analizó la eficiencia del sistema, la reducción de insumos externos, la generación de productos derivados de los rastrojos, y su contribución a la economía familiar (Tablas 1 - 3).

Tabla 1. Criterios y definiciones de la dimensión económica.

Criterio Original	Criterio Consolidado	Definición
Reducción de insumos externos	Eficiencia productiva	Disminución de dependencia de fertilizantes/pesticidas comerciales.
Diversificación económica	Diversificación ingresos	Ingresos adicionales por uso de rastrojos (venta, trueque y bioinsumos).
Generación de productos	Afinidad por la innovación	Transformación de rastrojos en productos (sustratos y alimento animal).

Diversificación alimentaria	Autogestión de Insumos	Uso de rastrojos como complemento/sustituto alimenticio para ganado.
Reducción de costos	Rentabilidad	Disminución de costos de producción por manejo sostenible de rastrojos.

*Fuentes: FAO (2018), entrevistas a 31 productores

Tabla 2. Peso de evaluación y antecedentes por cada criterio de la dimensión económica.

Criterio	Peso	Antecedente	Referencias
Eficiencia productiva	30%	La reducción de insumos externos aumenta la resiliencia del sistema productivo. Estudios demuestran que disminuye costos en un 25-40% y mejora la autonomía de pequeños productores (Altieri, 2018). En México, productores que adoptaron estas prácticas reportaron incrementos del 15% en rendimientos (INIFAP, 2022).	1. Altieri, M. (2018). Agroecology 2. INIFAP (2022). Manual de Agricultura Sustentable
Diversificación ingresos	25%	Sistemas diversificados son menos vulnerables a fluctuaciones de mercado. Pretty (2006) documentó un aumento del 35% en estabilidad financiera. En Chiapas, la venta de subproductos de rastrojo generó ingresos extras de \$500 MXN/familia/mes (SADER, 2021).	1. Pretty, J. (2006). Env. Science & Tech 2. SADER, (2021). Reporte de Casos Exitosos
Afinidad por la innovación	15%	Transformar rastrojos en productos eleva ingresos. Cruz <i>et al.</i> , (2019) mostró que bioinsumos derivados de rastrojos aumentan ganancias en un 20%. En Michoacán, artesanías con rastrojo generan \$200 MXN adicionales por unidad (INPI, 2020).	1. Cruz <i>et al.</i> , (2019) Rev. Mex. Agroecosistemas 2. (INPI,2020) Proyectos Productivos
Autogestión de insumos	15%	Uso de rastrojos como forraje reduce gastos en alimentación animal. Van der Ploeg (2014) reportó ahorros del 25%. En	1. Van der Ploeg, J.D. (2014). J. Agrarian Change

		Sonora, productores sustituyeron 70% de alfalfa con rastrojo de frijol (INIFAP, 2021).	2. INIFAP (2021). Forrajes Alternativos
Rentabilidad	15%	Prácticas con rastrojos mejoran el balance costo-beneficio. FAO (2020) documentó aumentos del 20% en márgenes netos. En Oaxaca, el acolchado redujo costos en \$8,000 MXN/ha/año (Instituto de GeografíaUNAM (2022).).	1. FAO (2020). El estado mundial 2. Instituto de GeografíaUNAM (2022). Estudios de Caso

Tabla 3. Tabla de asignación de preguntas por indicador de la dimensión económica.

Indicador	Preguntas Clave	Fundamentación Científica
Autogestión de insumos	1. ¿Qué tipo de insumos utiliza? 4. ¿Qué insumos ha dejado de comprar al usar rastrojo? 5. ¿Cuánto gasta anual en insumos?	Evalúa la transición hacia sistemas agroecológicos (Altieri, 1999) y reducción de dependencia externa (Pretty, 2008)
Afinidad por la innovación	3. ¿Ha considerado sustituir insumos químicos? 7. ¿Ve oportunidades económicas en el rastrojo? 11. ¿Qué obstáculos identifica?	Mide la adopción de innovaciones (Rogers, 2003) y barreras percibidas (Pannell et al., 2006)
Diversificación de ingresos	6. ¿Qué otros productos generan? 8. ¿Qué derivados ha producido? 10. ¿Elabora composta/forraje?	Corroborar estrategias de diversificación (Lin, 2011) y economía circular (Ellen MacArthur Found., 2015)
Eficiencia productiva	12. ¿Cómo usa el rastrojo como alimento? 13. ¿Importancia en alimentación ganadera? 14. ¿Genera ahorros operativos?	Valora optimización de recursos (FAO, 2013) y sustitución de insumos (Van Soest, 1991)
Rentabilidad	2. Frecuencia de compra de insumos 9. Impacto en ingresos familiares 15. Disposición a implementar cambios	Analiza relación costo-beneficio (Dillon, 1980) y elasticidad de sustitución (McFadden, 1978)

Dimensión ambiental

Se valoraron las prácticas que contribuyen a la conservación ambiental, la regeneración del suelo, la promoción de biodiversidad microbiana y la disminución de la huella ecológica (Tablas 4 – 6).

Tabla 4. Criterios y definiciones de la dimensión ambiental.

Criterio Original	Criterio Consolidado	Definición
No quema de residuos	Conservación ambiental	Evita emisiones de CO ₂ y degradación de suelos.
Recuperación de suelos	Regeneración edáfica	Mejora en materia orgánica, estructura y fertilidad del suelo.
Promoción de biodiversidad	Salud del suelo	Presencia de microorganismos benéficos (hongos, bacterias).
Reducción de contaminación	Huella ecológica	Minimización de transporte de insumos externos.

*Fuentes INECC, (2018): Prioriza suelo y no quema, coincidiendo con estándares de agricultura regenerativa.

Tabla 5. Peso de evaluación y antecedentes por cada criterio de la dimensión ambiental.

Criterio	Peso	Justificación	Referencias Clave
Conservación ambiental	50%	Evitar la quema previene emisiones de CO ₂ . IPCC (2019) estima una reducción del 90% en carbono liberado. En Yucatán, comunidades eliminaron la quema en 100% de parcelas (SEMARNAT, 2020).	1. IPCC (2019). Special Report 2. SEMARNAT (2020). Programa de No Quema
Regeneración edáfica y	30%	El acolchado incrementa materia orgánica. Lal (2020) demostró que +1% de MO retiene 150,000 L agua/ha. En Tlaxcala, suelos mejoraron fertilidad en 0.8% anual (UATx, 2021).	1. Lal, R. (2020). Soil Systems 2. UATx (2021). Estudios de Suelos
Salud del suelo		Microorganismos benéficos aumentan disponibilidad de nutrientes. Thiele-Bruhn (2020) reportó incrementos del 25-40%. En Veracruz, compostas con rastrojo elevaron biodiversidad microbiana en 30% (COLPOS, 2019).	1. Thiele-Bruhn, S. (2020). Frontiers 2. COLPOS, (2019). Informe Técnico
Huella ecológica	20%	Reducir transporte de insumos baja emisiones. FAO (2018) mostró disminuciones del 50% en huella de carbono. En Hidalgo, el uso de maquinaria compartida ahorró 60% de diésel (SADER, 2021).	1. FAO (2018). Agricultura Sostenible 2. SADER, (2021). Reporte de Eficiencia

Tabla 6. Tabla de asignación de preguntas por indicador de la dimensión ambiental.

Indicador	Preguntas Clave	Fundamentación Científica
1. Conservación Ambiental	2. ¿Con qué frecuencia quema el rastrojo? 3. ¿Conoce alternativas a la quema? 8. ¿Conoce el impacto en biodiversidad del suelo?	Evalúa reducción de prácticas contaminantes (IPCC, 2019) y conservación de agroecosistemas (Altieri, 1999)
2. Salud y Regeneración Edáfica	1. % rastrojo para abonos/forraje 4. Uso como cobertura 5. Uso de biofertilizantes 6. Prácticas de mejora 7. Cambios en calidad (1-5)	Combina: - Parámetros edáficos (Doran & Parkin, 1994) - Ciclos biogeoquímicos (Lal, 2015)
3. Huella Ecológica	9. Distancia de transporte 10. Costos/tiempo de transporte	Cuantifica impacto logístico (Wackernagel & Rees, 1996)

Dimensión social

Se evaluaron aspectos relacionados con la equidad de género, el capital cultural, la innovación y la cohesión social en el manejo comunitario de los recursos (Tablas 7 – 9).

Tabla 7. Criterios y definiciones de la dimensión social.

Criterio Original	Criterio Consolidado	Definición Operativa
Equidad de género	Inclusión social	Participación equitativa en decisiones y acceso a recursos.
Cohesión comunitaria	Organización colectiva	Frecuencia de actividades grupales (mingas, intercambios).
Intercambio de saberes	Capital cultural	Transferencia de conocimientos tradicionales/técnicos.
Apertura a técnicas	Innovación tecnológica	Adopción de prácticas agroecológicas.

*Fuentes OXFAM (2021), Aitken *et al.* (2011).

Tabla 8. Peso de evaluación y antecedentes por cada criterio de la dimensión social.

Criterio	Peso	Justificación	Referencias
Equidad de género	15%	La participación femenina incrementa adopción de prácticas. FAO (2020) reportó +40% en eficiencia. En Guerrero, mujeres lideran 40% de proyectos (INMUJERES, 2023).	1. FAO (2020). Género y Agricultura

			2. INMUJERES (2023). Estudio Guerrero
Cohesión comunitaria	25%	Las "mingas" optimizan recursos. Ostrom (2009) demostró 50% más eficiencia en manejo grupal. En Morelos, 85% de productores participan en actividades colectivas (SAGARPA, 2021).	1. Ostrom, E. (2009). Governing 2. SAGARPA (2021). Experiencias Exitosas
Capital cultural	30%	El intercambio de saberes impulsa innovación. Toledo (2017) documentó +40% en resiliencia. En Zacatecas, talleres recuperaron 8 técnicas ancestrales (CDI, 2022).	1. Toledo, V.M. (2017). Ethnoecology 2. CDI (2022). Saberes Locales
Innovación tecnológica	30%	La apertura a técnicas nuevas mejora adaptación. Rogers (2003) vinculó adopción con redes colaborativas. En Nayarit, 75% de jóvenes adoptaron biochar (CIMMYT, 2020).	1. Rogers, E.M. (2003). Diffusion 2. CIMMYT (2020). Reporte de Adopción

Tabla 9. Tabla de asignación de preguntas por indicador de la dimensión social.

Indicador	Preguntas Clave	Fundamentación Científica
Equidad de Género	1. Participantes en decisiones 2. Participación mujeres/jóvenes 3. Escala de equidad (1-5)	Teoría de capacidades (Sen, 2001) Género en agricultura (FAO, 2020)
Cohesión Comunitaria	4. Colaboración con productores 5. Participación en grupos 7. Intercambio de ideas 8. Compartir experiencias	Capital social (Putnam, 2000) Redes agrícolas (Pretty, 2003)
Capital Cultural	6. Capacitación recibida 8. Transferencia de conocimiento	Bourdieu (1986) Aprendizaje social (Bandura, 1977)
Innovación Tecnológica	9. Disposición a probar técnicas 10. Factores para cambios	Teoría difusión innovaciones (Rogers, 2003) Barreras adopción (Pannell, 2006)

Sistematización de la información

Una vez asignados los puntajes por productor e indicador, se realizó una sistematización de resultados que permitió identificar:

- Patrones comunes en las prácticas de manejo de rastrojos.
- Fortalezas y áreas de oportunidad en términos de sustentabilidad.
- Niveles de apropiación de prácticas agroecológicas dentro del sistema.

7.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 2

7.3.1 Origen de la cepa y producción de inóculo

Esta investigación se llevó a cabo en el laboratorio 204 de hongos comestibles y fitopatología del Centro de Agroecología, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Para el material biológico: Se utilizó la cepa del laboratorio 204 de hongos comestibles y fitopatología del Centro de Agroecología, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Para los residuos agrícolas empleados para la producción de basidiomas se utilizaron los residuos agrícolas predominantes de la localidad de Ocotepéc y como grupo control paja de trigo (*Triticum* sp.). Para la producción de inóculo: El inóculo se preparó con sorgo (*Sorghum* sp.) siguiendo la metodología descrita por Romero-Arenas *et al.*, (2018). El inóculo o semilla se mantuvo a temperatura ambiente hasta su posterior estudio.

7.3.2 Inoculación en residuos agrícolas predominantes

Para la siembra de la cepa *H. erinaceus*, los materiales lignocelulósicos fueron esterilizados a 121°C por 45 minutos, transcurrido el tiempo, se transportaron al área de siembra y se procedió a la preparación de unidades de producción bajo un modelo estadístico al azar para cada residuo agrícola predominante; se prepararon bolsas de plástico de 4 kg (peso húmedo) de cada residuo agrícola en una relación 1:10 con la “semilla” previamente preparada. Las unidades de producción se incubaron a temperatura ambiente (26 ± 2 °C), hasta la aparición de primordios. Por último, las unidades de producción se trasladaron al cuarto de fructificación donde se propiciaron condiciones apropiadas de humedad (70 - 80%), temperatura (26° - 28°C), luz diurna indirecta y extracción de aire por 1 hora, cada día. Los datos de producción que se registraron fueron: peso fresco de hongos cosechados por cosecha, eficiencia biológica [EB = Peso fresco de los hongos cosechados (g) / Peso seco del substrato (g)] x 100, tasa de producción (TP = EB / tiempo transcurrido desde la inoculación hasta la

última cosecha) y tasa de biodegradación ($TB = \text{Peso seco del sustrato inicial} - \text{Peso seco del sustrato final} / \text{Peso seco del sustrato inicial} \times 100$) (Tabla 10). Además, el rendimiento se expresó en términos de gramos de hongos frescos por m² durante ciclo de producción (Romero-Arenas *et al.*, 2010).

7.3.3 Determinación de parámetros bromatológicos y estimación de la relación C/N

Los análisis bromatológicos se realizaron con el objetivo de determinar el contenido de humedad y cenizas totales de los sustratos evaluados (olote, rastrojo, aserrín, zacate y ocoxal), utilizados para la producción de *H. erinaceus* (Tabla 10).

El contenido de humedad (%) se determinó mediante el método gravimétrico por secado en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante, mientras que el contenido de cenizas totales (%) se obtuvo por calcinación de las muestras en mufla a 550 °C durante cuatro horas, de acuerdo con procedimientos descritos por la AOAC (2005). A partir de los resultados de cenizas se estimó el porcentaje de materia orgánica (MO) mediante la expresión:

$$MO = 100 - \text{Cenizas (\%)}$$

Posteriormente, se calculó el contenido de carbono total (% C) aplicando factores de conversión bibliográficos específicos para residuos lignocelulósicos y materiales leñosos (0.43 - 0.50 según la naturaleza del sustrato). En ausencia de datos analíticos de nitrógeno, el contenido de nitrógeno (% N) se estimó a partir de valores reportados en la literatura, permitiendo calcular de manera aproximada la relación carbono / nitrógeno (C / N) conforme a la ecuación:

$$C/N = \frac{\%C}{\%N}$$

Tabla 10: Parámetros fisicoquímicos de residuos agrícolas y restos vegetales utilizados para elaboración de sustrato para *H. erinaceus*.

Sustratos	Humedad	Ceniza	Materia orgánica	C	N	Relación C/N
	Total	Total	Total			
	(%)					
Aserrín Pino	57.094	8.15	91.85	45.93	0.23	200:1
Ocoxal	90.556	9.68	90.32	40.64	0.34	120:1
Olote de maíz	42.913	9.85	90.15	41.47	0.47	88.20:1

Rastrojo de maíz	70.665	9.88	90.12	38.75	0.48	80:1
Zacate de trigo	67.917	8.28	91.72	38.52	1.50	25.70:1
* Mezcla sustrato	45.40	9.08	95.46	47.30	0.38	90:1

*La mezcla contiene: 50 % aserrín de encino, 30 % zacate de trigo y 20 % de olote de maíz. El contenido de carbono (%C) y nitrógeno (%N) se estimó a partir de la materia orgánica (MO) mediante las fórmulas propuestas por Nelson y Sommers (1996), donde $\%C = MO \times 0.50$ y $\%N = \%C / (C/N)$. La relación C/N se calculó considerando los valores aproximados de carbono y nitrógeno totales de cada sustrato con la fórmula $C/N = (\%N) / (\%C)$.

7.3.4 Análisis estadísticos

Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y se aplicó la prueba de comparación múltiple de Waller-Duncan ($p < 0.05$) para determinar las diferencias en el desempeño entre los residuos agrícolas de la región, utilizando los paquetes estadísticos SPSS Statistics versión 17 (Statistical Package for the Social Science) y R v4.5.0.

7.4 OBJETIVO ESPECÍFICO 3

7.4.1 Purificación y caracterización química del extracto crudo de *Hericiium erinaceus* sobre diferentes residuos agrícolas

Se realizó una maceración del hongo *H. erinaceus* utilizando cuerpos fructíferos frescos obtenidos de los cultivos experimentales sobre distintos residuos agrícolas predominantes en la región del Altiplano Poblano. Se pesaron 10 gr de muestra y se colocaron en un matraz de bola de 500 ml con 400 ml de etanol absoluto (grado analítico, J. T Baker), exponiéndose a una temperatura controlada de 85°C por dos horas. Durante el proceso, el solvente evaporando se condensó en el refrigerante superior a reincorporarse al sistema de maceración, asegurando una extracción continua de metabolitos. Este procedimiento se repitió dos veces con la misma materia, renovando el solvente en cada ciclo y combinando los extractos obtenidos. Posteriormente, se realizó una filtración con Papel Whatman No 1 empleando un embudo de vidrio y matraz Erlenmeyer de 400 ml, con el fin de obtener un extracto homogéneo y libre de partículas sólidas. La materia residual fue conservada para posibles extracciones adicionales.

Concentración del extracto

Los extractos etanólico y acuosos se concentraron mediante destilación y evaporación rotatoria utilizando un rotavapor (Büchi R-300), con control de vacío entre 260 y 250 mbar, refrigerante a 2.0°C y baño con termostato a 60 °C. El solvente recuperado fue decantado y almacenado, mientras que los extractos se evaporaron a baño maría hasta obtener un volumen final de 2.9504 ml de extracto etanólico concentrado. Los extractos obtenidos se almacenaron en frascos ámbar, protegidos de la luz, para evitar la degradación fotoquímica de los compuestos.

Cromatografía en capa fina (TLC)

Se emplearon placas cromatográficas de gel de sílice 60 F 254, Merck recortadas a dimensiones de 1.5 cm. Se trazaron líneas de referencia en los extremos superior e inferior de las placas y se aplicaron tres puntos equidistantes correspondientes a:

1. Sustancias guía estándar.
2. Extracto etanólico de *H. erinaceus*.
3. Extracto acuoso de *H. erinaceus*.

Se evaluaron diferentes sistemas de solventes para determinar la mejor resolución de metabolitos secundarios, considerando proporciones de diclorometano, metanol, acetato de etilo y hexano (9:1, 8:2 y 7:3), conforme a los criterios propuestos por Stahl (1969) y Harborne (1984). Los resultados demostraron que la mezcla hexano - acetato de etilo (9:1) ofrecía la mayor separación, evidenciando bandas definidas de compuestos polares y no polares.

Purificación por cromatografía en columna

Los extractos se purificaron mediante cromatografía en columna con gel de sílice 60 (70-230 mesh ASTM) como fase estacionaria y hexano - acetato de etilo (9:1) como fase móvil, siguiendo metodologías descritas por Meyer (2010). Las fracciones recolectadas se sumaron y analizaron TLC para identificar aquellas con presencia de metabolitos secundarios.

Las fracciones seleccionadas se concentraron nuevamente en el rotavapor y se sometieron a vacío parcial para eliminar residuos de solvente, obteniendo los metabolitos en forma sólida.

Este procedimiento permitió asegurar una alta pureza y minimizar la degradación térmica de los compuestos (Wagner *et al.*, 1996).

Análisis espectrofotométrico UV-VIS

Las fracciones purificadas fueron analizadas mediante UV-VIS utilizando un espectrofotómetro PerkingElmer Lambda 25, en el rango de 200-800 nm. Esta técnica se empleó para la identificación preliminar de compuestos fenólicos y terpenoides, siguiendo los criterios establecidos por Sasidharan *et al.*, (2011). Los resultados permitieron una evaluación cualitativa de la composición de los extractos y su correlación con las propiedades antioxidantes reportadas para *H. erinaceus*.

Caracterización química mediante espectroscopia IR y ¹H-RMN

Una vez obtenidos los extractos purificados, se procedió a su caracterización estructural para identificar los grupos funcionales y estructuras moleculares predominantes. Se aplicaron técnicas complementarias de espectroscopia infrarroja (IR) y en 0.7 ml de deuterocloruro de metileno (CDI₃) para ¹H-RMN. Las muestras se filtraron con papel Whatman No. 1 para eliminar residuos y asegurar la transparencia óptica requerida.

Espectroscopía infrarroja (IR)

El análisis de IR se realizó en un espectrofotómetro PerkinElmer Frontier FTIR en el rango de 4000-400 cm⁻¹, con celdas de KBr en modo de transmitancia. Se compararon los espectros del extracto crudo (control) y del extracto concentrado (M2), identificando bandas características asociadas a grupos funcionales hidroxilos (-OH), carbonilo (C=O), enlaces C-H alifáticos y aromáticos, y estructuras C-O-C de polisacáridos (Wang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020). Las variaciones en intensidad y desplazamiento de bandas fueron analizadas como indicadores de enriquecimiento molecular.

Resonancia Magnética Nuclear (¹H-RMN)

Los análisis se realizaron en un espectrofotómetro (Bruker Avance III) 400 MHz a 25 °C, empleando el tetrametilsilano (TMS) como referencia interna. Se efectuaron 64 escaneos por muestra, con un tiempo de adquisición de 2.0s. Los desplazamientos químicos (δ) se

expresaron en partes por millón (ppm). Las señales se procesaron con el software TopSpin 4.0, permitiendo la identificación de regiones alifáticas (δ 0.8-1.5 ppm) y aromáticas (δ 6.0-8.0 ppm). Las asignaciones se corroboraron con datos de literatura para hericenonas, erinacinas, ergosterol y ácidos grasos insaturados (Li *et al.*, 2022; Kusuma *et al.*, 2019; Mizuno, 1999).

7.4.2 Integración y validación de resultados de la caracterización química

La información obtenida de ambas técnicas permitió correlacionar los grupos funcionales con las estructuras moleculares observados, confirmado la presencia de metabolitos neuroactivos y esteroides característicos del género *Hericium*. Los análisis espectroscópicos fueron realizados por duplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados, garantizando la fiabilidad del procedimiento y la trazabilidad analítica del estudio.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSION

8.1 PANORAMA GENERAL DE NIVELES DE SUSTENTABILIDAD

Los resultados del análisis descriptivo revelan un patrón consistente de sostenibilidad ambiental priorizada sobre dimensiones socioeconómicas en los sistemas evaluados (Tabla 1). El indicador de Conservación (91.80 %) demuestran no solo los mayores niveles de cumplimiento, sino también la menor variabilidad relativa (CV: 12.08 % y 7.41 %, respectivamente), lo que sugiere la efectividad homogénea de las prácticas de manejo conservacionista implementadas. Contrariamente, dimensiones críticas como Equidad de Género (77.23 %), Rentabilidad (79.78 %) y Huella Ecológica (78.42 %) presentan los desempeños más bajos del sistema, evidenciando desafíos estructurales entre el sitio de estudio. Esta disparidad refleja un trade-off característico de los sistemas agroecológicos, donde la estabilidad ecológica se logra en detrimento de la viabilidad económica y la equidad social (Rosa-Schleich et al. 2019).

La heterogeneidad significativa en indicadores socioeconómicos, particularmente en Autogestión (CV: 21.65%) y Diversificación (CV: 18.61 %), sugiere la coexistencia de distintos niveles de capacidad de gestión y adaptación entre productores. La marcada asimetría en Capital Social (Media: 5.26 vs Mediana: 6.00) y los valores mínimos extremos en Cohesión Social (4.00/12) indican la presencia de subpoblaciones críticas que requieren intervenciones diferenciadas. Estos hallazgos destacan la necesidad de reorientar las estrategias de desarrollo hacia un enfoque integral que equilibre la solidez ambiental con el fortalecimiento de los capitales social, humano y financiero, superando así el paradigma tradicional que prioriza unilateralmente la dimensión ecológica.

Tabla 11: Estadísticos descriptivos de los indicadores de sostenibilidad agroecológica

Variable	(n=61)						
	Media	Mediana	Desv. Est	Min	Max	Total (%)	CV
Conservación ambiental	8.26	9.00	1.00	5.00	9.00	91.80	12.08
Manejo de suelo	12.51	13.00	1.15	10.00	15.00	83.39	9.19
Huella ecológica	4.70	5.00	1.13	3.00	6.00	78.42	24.03
Eficiencia del sistema	7.85	8.00	1.31	3.00	9.00	87.25	16.74
Rentabilidad	7.18	7.00	1.01	4.00	9.00	79.78	14.04
Diversificación	7.20	7.00	1.34	3.00	9.00	79.96	18.61
Innovación tecnología	7.90	8.00	1.18	5.00	9.00	87.80	14.92
Autogestión	7.20	7.00	1.56	4.00	9.00	79.96	21.65
Capital social	5.26	6.00	0.96	2.00	6.00	87.70	18.33
Adopción agroecológica	4.92	5.00	0.80	4.00	6.00	81.97	16.31
Cohesión comunitaria	9.72	10.00	1.99	4.00	12.00	81.01	20.50
Equidad de genero	6.95	7.00	1.42	3.00	9.00	77.23	20.42

En conjunto, la distribución observada evidencia que la dimensión ambiental domina en el nivel alto de sostenibilidad, mientras que la económica mantiene valores intermedios y la social presenta mayor dispersión hacia los niveles medio y bajo (Figura 3).

Se observa una clara diferenciación territorial, donde Ocoatepec alcanza los valores más altos en las tres dimensiones, Pizarro se sitúa en un rango intermedio y Chichicauhtla refleja los valores más bajos, evidenciando distintos grados de avance hacia la sustentabilidad integral.

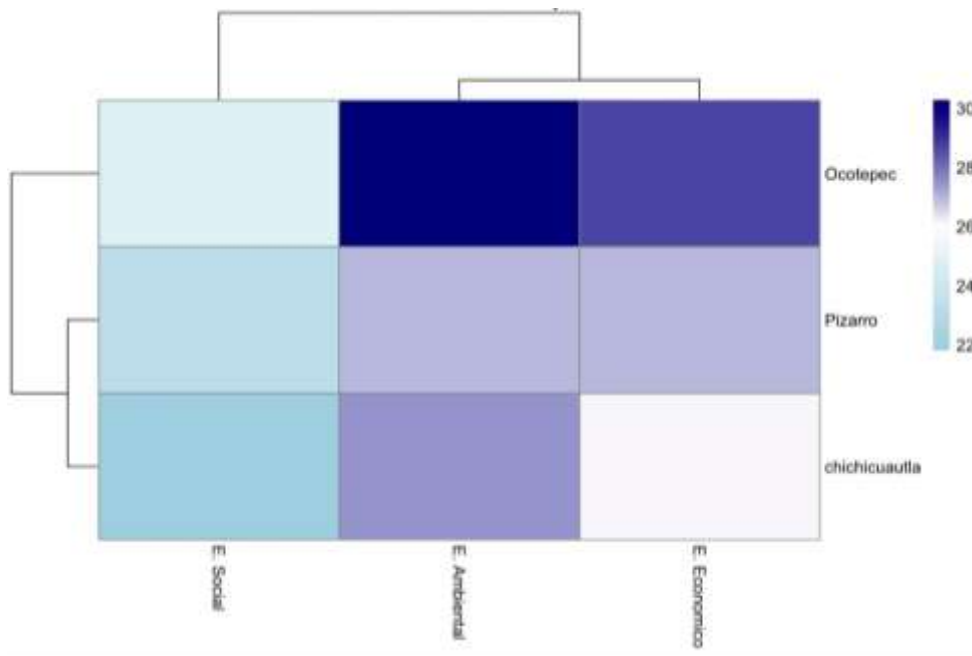


Figura 3. Distribución de las dimensiones de sostenibilidad.

En la dimensión ambiental, Ocotepc sobresalió con una eficiencia aproximada de 30 %, asociada a la adopción de prácticas agroecológicas como el manejo del rastrojo, el uso de acolchado orgánico y la eliminación de la quema. Estas estrategias han mostrado reducir hasta en un 90 % las emisiones de CO₂ (Herrera-Sánchez y Gavilánez-Buñay 2023) y favorecer una regeneración edáfica con incrementos de 25–40 % en disponibilidad de nutrientes y hasta 30 % en biodiversidad microbiana (Furey y Tilman 2021).

Por su parte, Pizarro alcanzó un valor medio de eficiencia del 26 %, evidenciando avances parciales en el manejo sostenible de residuos agrícolas, aunque persisten prácticas convencionales como la quema de rastrojos de la región. Finalmente, Chichicauitla, con un valor cercano a 24 %, mantuvo una baja eficiencia ambiental, reflejando una escasa adopción de técnicas regenerativas y un uso intensivo del fuego, factores que contribuyen a la degradación del suelo y mayores emisiones de gases de efecto invernadero.

En la dimensión económica, Ocotepc registró valores altos, alrededor de 28 %, sustentados en su diversificación productiva, la generación de bioinsumos y la reducción de insumos externos. Estos factores han permitido incrementos de hasta 15 % en los rendimientos (Altieri y Toledo 2011) y 20 % en los ingresos complementarios mediante la producción artesanal (Alcazar-Sánchez y Gómez-Martínez 2022). Pizarro, con 26 %, mostró una eficiencia económica intermedia, caracterizada por una rentabilidad aceptable y una adopción parcial de innovaciones. No obstante, su dependencia de factores estructurales y limitada

diversificación lo posicionan en una etapa de transición hacia modelos más sostenibles. En contraste, Chichicuautila, con apenas 22 %, mantuvo ingresos estables, pero escasamente diversificados, sin apertura a la innovación, lo que restringe su resiliencia ante fluctuaciones del mercado (Pretty 2006).

En la dimensión social, Ocoatepec presentó un nivel de eficiencia moderado a alto, con aproximadamente 26 %, asociado a altos niveles de cohesión comunitaria, participación y capital cultural. Estas condiciones fortalecen la resiliencia social y la capacidad colectiva de innovación (Somoza-Medina y Relea-Fernández 2024). En contraste, Pizarro, con valores similares (25 %), evidenció una cohesión comunitaria parcial y participación limitada de mujeres y jóvenes, factores que reducen la densidad organizativa. Finalmente, Chichicuautila, con cerca de 24 %, registró la menor eficiencia social, reflejando bajos niveles de organización y capital cultural, elementos considerados esenciales para la apropiación de prácticas agroecológicas (D'Annolfo *et al.* 2017).

Este resultado subraya la necesidad de estrategias integrales que promuevan no solo la mejora de cada dimensión por separado sino su convergencia, una práctica espacial misma que puede ser considerada desde una perspectiva territorial (Fig. 4).

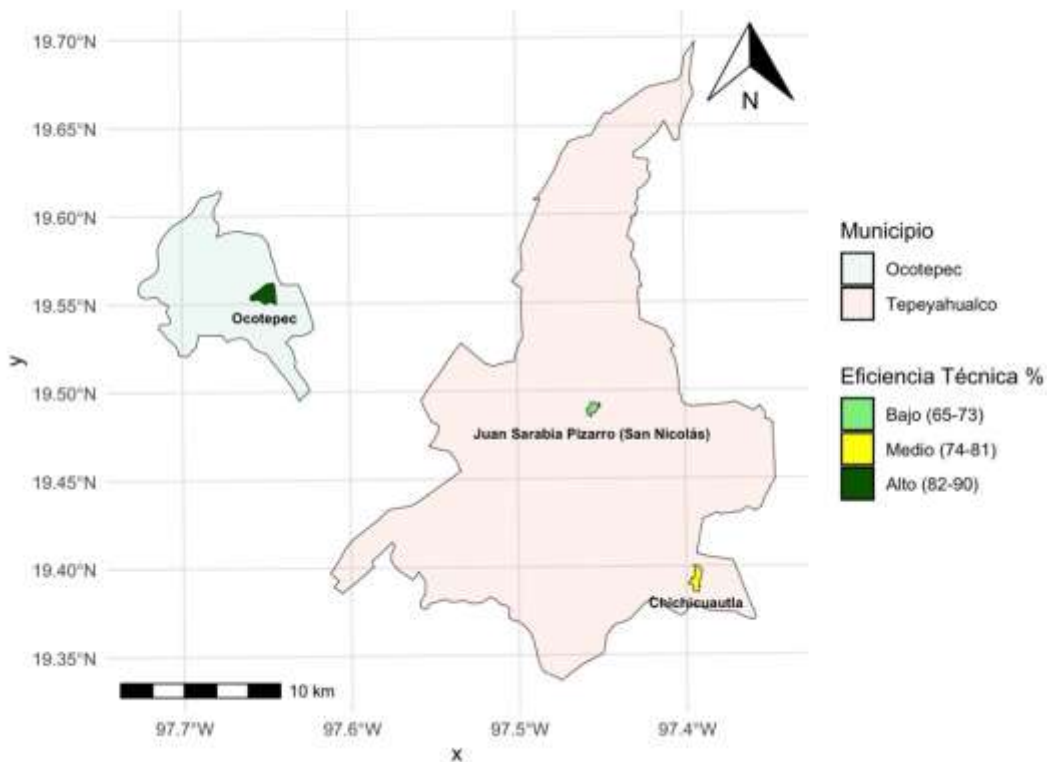


Figura 4. *Distribución geográfica de la eficiencia técnica en el manejo de rastrojos agrícolas y adopción tecnológica en comunidades del Altiplano Poblano.*

La Figura 4 muestra la distribución espacial de la eficiencia técnica en el manejo y aprovechamiento de rastrojos agrícolas en el municipio de Tepeyahualco, Puebla. Este patrón refleja diferencias significativas en la capacidad tecnológica y en el grado de adopción de prácticas agroecológicas entre las localidades evaluadas.

En el sector noroccidental, la localidad de Ocotepc se clasifica dentro del rango de eficiencia alta (82–90 %), lo que sugiere un avanzado nivel de adopción tecnológica orientado al aprovechamiento de residuos agrícolas. Esta eficiencia está asociada a la implementación de técnicas como la incorporación de rastrojos al suelo, uso de acolchados orgánicos, compostaje y biofermentos, prácticas que han demostrado aumentar la productividad y reducir la dependencia de insumos externos. La consolidación de estas estrategias ha sido posible gracias a un tejido social cohesionado y a la transferencia activa de conocimientos técnicos, factores que han favorecido la transición hacia modelos agroecológicos sostenibles. Por su parte, Juan Sarabia Pizarro, presenta un nivel de eficiencia media (74–81 %), reflejando un proceso intermedio de adopción tecnológica. Aunque se observan esfuerzos orientados al aprovechamiento de rastrojos, la heterogeneidad en las capacidades técnicas y el acceso limitado a recursos de capacitación restringen el potencial de eficiencia del sistema productivo. Esta situación sugiere una fase de transición hacia esquemas más sustentables, donde la incorporación de innovaciones aún depende de la disponibilidad de infraestructura y del fortalecimiento organizativo local.

En contraste, Chichicuatla, ubicada en el sector suroriental, registra valores correspondientes al nivel bajo de eficiencia (65–73 %). Esta condición refleja una limitada adopción tecnológica y la persistencia de prácticas convencionales como la quema de residuos, las cuales reducen la calidad del suelo y limitan las oportunidades de valorización de los rastrojos. La baja eficiencia observada puede atribuirse a barreras socioeconómicas, escasa asistencia técnica y limitada apropiación del conocimiento agroecológico, factores que obstaculizan la transición hacia sistemas productivos regenerativos (Schiller et al. 2020). El patrón espacial descrito evidencia que la eficiencia técnica no depende únicamente del acceso a tecnologías, sino también de las condiciones sociales y del capital humano

disponible en cada comunidad. Coincidiendo con lo planteado por Altieri (2011) y Pretty (2006), la resiliencia y sostenibilidad de los agroecosistemas se sustentan tanto en la innovación técnica como en la capacidad colectiva de gestión y aprendizaje comunitario. En este sentido, la experiencia de Ocoteppec ejemplifica cómo la articulación entre conocimiento tradicional, innovación y cohesión social puede derivar en modelos productivos sostenibles, donde el aprovechamiento de rastrojos agrícolas para la producción de hongos comestibles se convierte en un eje estratégico para la regeneración ecológica y el desarrollo rural integral (Wendiro et al. 2019).

8.2 ANÁLISIS MULTIVARIADO DE SOSTENIBILIDAD COMUNITARIA

La aplicación conjunta de la Investigación Acción Participativa (IAP) y el análisis multicriterio evidenciaron distintos niveles de sostenibilidad entre las diferentes comunidades evaluadas. El Análisis de Componentes Principales (PCA) explicó el 40.4 % de la variabilidad total en sus dos primeros componentes (Fig. 5), mientras que el Mapa de Calor expresó de manera clara cómo las regiones de Ocoteppec, Pizarro y Chichicuautila presentan una afinidad diferenciada por las dimensiones social, ambiental y económica (Fig. 5).

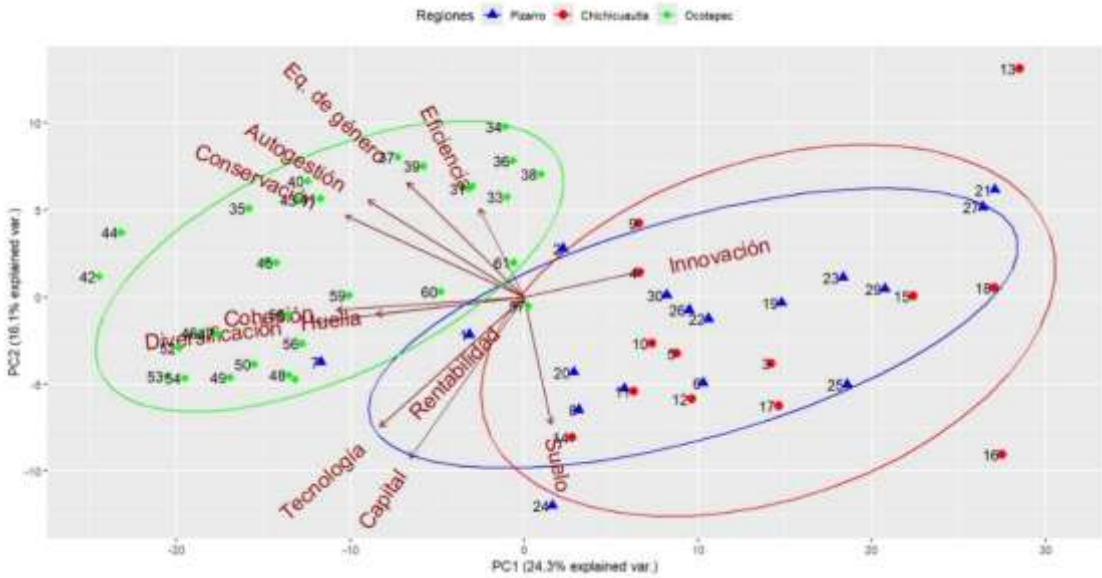


Figura 5. Análisis de componentes principales (PCA) de los indicadores de sustentabilidad en tres comunidades.

Ocotepec se ubicó en el cuadrante mayormente asociado a vectores de conservación ambiental, cohesión social y diversificación económica (Fig. 5).

Económicamente, Ocotepec mostró una alta diversificación productiva y valores moderados en la apertura a la innovación (Fig. 5) viéndose esto reflejado en su eficiencia económica, con una reducción de insumos externos que, según Altieri (2018) e INIFAP (2022), esto puede llegar incrementar los rendimientos hasta en un 15%. Se ha reportado que la generación de bioinsumos o artesanías derivadas del rastrojo favorece ingresos adicionales, con ganancias incrementadas hasta en un 20% (Cruz *et al.*, 2019). Asimismo, la diversificación de ingresos aumenta la estabilidad económica, disminuyendo la vulnerabilidad frente a fluctuaciones del mercado (Pretty, 2006), tal como lo ejemplifican experiencias en Chiapas con ingresos extra de \$500 MXN mensuales por familia (SAGARPA, 2021).

En la dimensión social, Ocotepec evidenció altos niveles de cohesión y capital social (Fig. 5), fundamentales para sostener dinámicas colectivas y la transmisión de saberes. Según Ostrom (2009), estas estructuras incrementan en un 50% la eficiencia en el manejo colectivo de recursos. El capital cultural actúa también como motor de la innovación, favoreciendo la resiliencia comunitaria (Toledo, 2017). Talleres de revalorización cultural han demostrado resultados similares en Zacatecas, donde se recuperaron ocho prácticas tradicionales (CDI, 2022). Adicionalmente la inclusión activa de mujeres y jóvenes en la toma de decisiones, además de incentivar la innovación tecnológica, fortalece la eficiencia productiva (FAO, 2020; INMUJERES, 2023). Por tal motivo se considera que dicha región presenta un nivel moderado a alto en lo que respecta a eficiencia social (Fig. 6).

Por otro lado, Pizarro se ubicó en una posición intermedia dentro del PCA, cercana al eje central. Aunque presenta avances hacia la sustentabilidad, mantiene un perfil enfocado principalmente en la dimensión económica, con valores aceptables en rentabilidad y

adopción parcial de innovaciones (Fig. 5). Este comportamiento sugiere un proceso de transición aún dependiente de factores estructurales. Su eficiencia técnica permite resultados económicos moderados, como han descrito Altieri (2018) y Rogers (2003), quienes plantean que la rentabilidad inicial puede incentivar procesos de innovación, aunque estos requieren inexorablemente del soporte de una base social sólida para consolidarse.

Socialmente, la comunidad muestra un nivel intermedio de cohesión, con cierta participación femenina y transmisión de saberes, aunque sin alcanzar la densidad organizativa de Ocoteppec, viéndose esto reflejado en sus bajos niveles de eficiencia social (Fig. 6). Ambientalmente, se observan esfuerzos mínimos por disminuir prácticas como la quema, pero estas aún persisten, limitando el potencial regenerativo del agroecosistema. El perfil de Pizarro demanda un fortalecimiento en las dimensiones social y ambiental para consolidar un modelo de sustentabilidad integral.

Chichicuautila se situó en el cuadrante opuesto a Ocoteppec, reflejando baja eficiencia en las tres dimensiones evaluadas (Figs. 5 y 6). En lo ambiental, persiste el uso intensivo de la quema de residuos, práctica que se ha reportado contribuye a la degradación del suelo y elevadas emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019). Su débil apropiación de técnicas de conservación edáfica indica un bajo grado de adopción de tecnologías regenerativas.

Desde la perspectiva económica, Chichicuautila mantiene ingresos estables, aunque con escasa diversificación y nula apertura a la innovación. Esta situación reduce su resiliencia ante escenarios de cambio climático o mercado. Socialmente, se registraron los valores más bajos en cohesión comunitaria, participación femenina y capital cultural, factores que, según Toledo (2017) y el INPI (2022), son determinantes para la apropiación de estrategias agroecológicas. En conjunto, Chichicuautila refleja un modelo productivo tradicional con limitada capacidad de transformación. La continuidad de estas prácticas es resultado de barreras sociales y culturales que restringen la transición hacia sistemas agroecológicos sostenibles.

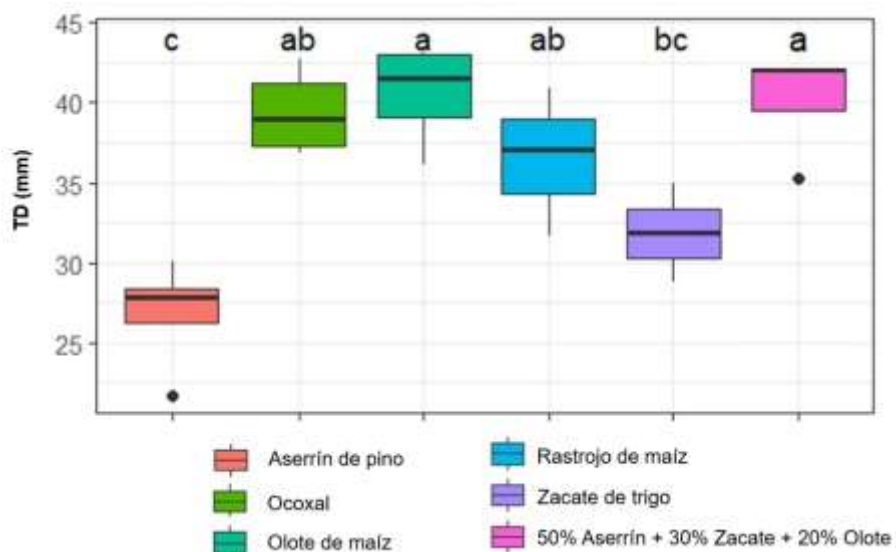
El análisis espacial integrado de las tres comunidades, complementado con el Mapa de Calor y dendrograma, evidenciaron cómo el desempeño en la sustentabilidad para cada región

depende de la interacción entre factores sociales, económicos y ambientales. Ocotepéc mostró un equilibrio destacado entre las dimensiones, lo que la posiciona como referente en prácticas agroecológicas sostenibles. Pizarro, en cambio, refleja un modelo en transición con predominancia económica, mientras que Chichicauhtla mantiene un enfoque tradicional, con escasa apertura al cambio.

Estos resultados coinciden con lo documentado por Altieri & Toledo (2011) y Pretty (2006), quienes señalaron que la resiliencia de los agroecosistemas no depende exclusivamente de intervenciones técnicas, sino de la solidez del tejido social y la apropiación colectiva del conocimiento. La experiencia de Ocotepéc demuestra que, cuando estas condiciones se alinean, es posible adoptar modelos productivos sostenibles y regenerativos como lo es el aprovechamiento de rastrojos para la producción de hongos comestibles.

8.3 EVALUACIÓN BIOLÓGICA DEL CULTIVO DE *HERICIUM ERINACEUS*

La evaluación conjunta de la tasa de desarrollo (TD: Fig. 7), velocidad de crecimiento (VC: Fig. 8) y cinética del micelio (CM: Fig. 9) de *H. erinaceus* sobre residuos agrícolas reveló diferencias marcadas en eficiencia biológica entre los sustratos. Los análisis estadísticos (Waller-Duncan $p < 0.05$) y la representación mediante diagramas de cajas y bigotes permitieron evidenciar la superioridad de ciertos residuos (olote, ocoxal y rastrojo de maíz) frente a otros como aserrín de pino, zacate o fibra de coco.



s cultivado sobre:es según las pruebasba

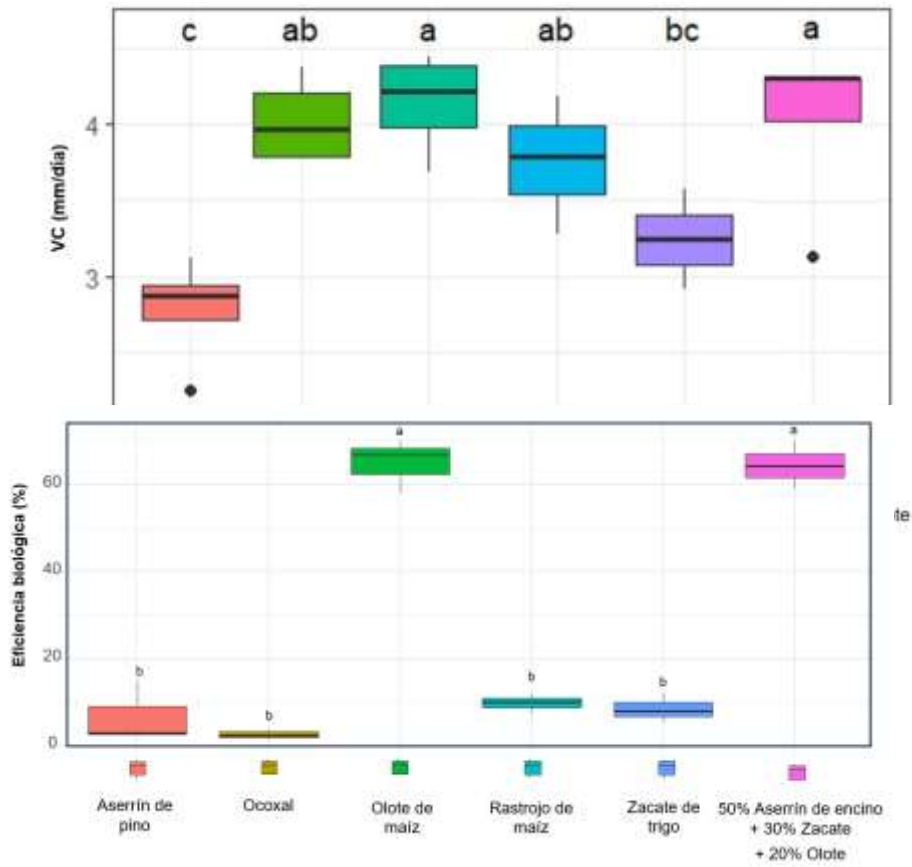


Figura 9. Eficiencia biológica (EB) del crecimiento de *H. erinaceus* cultivado sobre diferentes sustratos, letras diferentes representan diferencias significativas según las pruebas de prueba de Tukey ($p < 0.05$) *Elaboración propia.

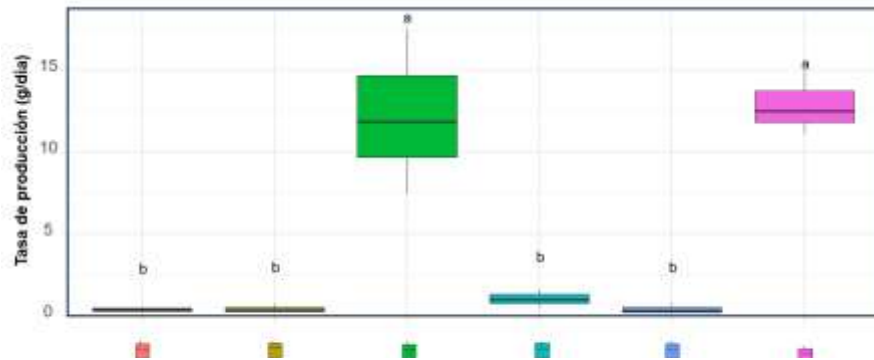


Figura 10. Tasa de producción (TP) del crecimiento de *H. erinaceus* cultivado sobre diferentes sustratos, letras diferentes representan diferencias significativas según las pruebas de prueba de Tukey ($p < 0.05$). *Elaboración propia.

Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas, tanto en el comportamiento biológico de *H. erinaceus* como en la composición fisicoquímica de los sustratos evaluados en el olote de maíz, alcanzó la mediana más alta en tasa de desarrollo (TD \approx 42mm) y velocidad de colonización (VC \approx 4.4 mm/día), mostrando un crecimiento lineal y sostenido desde el tercer día, con baja dispersión y sin valores típicos, de manera similar el rastrojo de maíz y el ocoxal presentaron tasas elevadas (38-40 mm y 4.2-4.4 mm/día, respectivamente), lo que indica una colonización uniforme y eficiente del micelio (Figs. 7 - 9).

En términos bromatológicos, estas tendencias se relacionan estrechamente con las características de composición de cada material. El ocoxal presentó el mayor contenido de humedad (90.5 %), lo que explica su elevada eficiencia biológica (452.7 g) y su destacada, capacidad de retención de agua (Tabla 10); sin embargo, su relación C/N (\sim 120) sugiere una descomposición lenta y una baja disponibilidad de nitrógeno, lo cual podría limitar la nutrición, micelial a largo plazo.

En contraste los residuos agrícolas, particularmente el Olote y el rastrojo de maíz, mostraron un balance más adecuado entre materia orgánica y nutrientes, con relaciones C/N estimadas de 88.2 y 80.0, respectivamente. Aunque estos valores son relativamente altos, reflejan una matriz lignocelulósica rica en celulosa y hemicelulosa, componentes que favorecen un

crecimiento sostenido del micelio bajo condiciones controladas. La eficiencia biológica obtenida (214 g para olote y 353 g para rastrojo) confirma su potencial como sustratos principales para la producción de *H. erinaceus*.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Ko *et al.*, (2004) y Chutimanukul *et al.*, (2023), quienes documentan que los materiales con buena porosidad, aireación y relaciones C/N intermedias, promueven una colonización temprana y homogénea, además de potenciar la síntesis de compuestos bioactivos y la actividad antioxidante. Asimismo, Jonathan *et al.*, (2012) y Wu *et al.*, (2021) destacan que los sustratos con contenido, moderado de nitrógeno y estructura fibrosa estable, favorecen rendimientos superiores y una fructificación más consistente.

Por el contrario, el aserrín de pino presentó el crecimiento más lento (≈ 2.8 mm/día), con una alta dispersión y valores extremos, mostrando un estancamiento evidente a partir del sexto día (Figs. 7 - 9). Su elevada relación C/N (~ 200) Y la presencia de compuestos fenólicos y resinoso (Gong *et al.*, 2020) explican el efecto inhibitorio observado sobre el desarrollo micelial. El rastrojo de trigo mostró una cinética irregular y un desarrollo inestable mientras que el zacate (C/N ≈ 25.7) y la fibra de coco, exhibieron un crecimiento inicial aceptable, pero con un declive progresivo (Figs. 8 y 9), posiblemente debido a limitaciones estructurales o nutricionales (Pham *et al.*, 2020).

En conjunto, los resultados fisicoquímicos y biológicos permiten inferir que los residuos agrícolas de maíz (olote y rastrojo), junto con ocoxal, constituyen los sustratos más eficientes para el cultivo de *H. erinaceus*. Su equilibrio entre humedad, estructura y composición lignocelulósica favorece una colonización rápida constante y homogénea, además de representar un aprovechamiento sostenible de subproductos agrícolas locales.

Estos hallazgos no sólo confirman la vía habilidad técnica del uso de residuos agrícolas en la producción de hongos comestibles, sino que también aportan evidencia científica al aprovechamiento circular de biomasa rural. La integración de estos materiales en sistemas productivos locales contribuye a la sustentabilidad agroecológica, al manejo eficiente, de residuos y al fortalecimiento de modelos de economía, circular en comunidades rurales del estado de Puebla.

8.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS METABOLITOS PRESENTES EN *HERICIUM ERINACEUS*

La caracterización química de los cuerpos fructíferos de *H. erinaceus* cultivados sobre residuos agrícolas predominantes del Altiplano Poblano permitió identificar la presencia de metabolitos secundarios mediante espectroscopía infrarroja (IR: Figs. 10 y 11) y resonancia magnética nuclear (RMN: Fig. 12), técnicas que revelan el perfil molecular de los compuestos bioactivos contenidos en el hongo. La metodología de extracción, purificación cromatográfica y análisis espectroscópico facilitó la obtención de extractos representativos de alta pureza, permitiendo una evaluación cualitativa confiable (Sasidharan *et al.*, 2011; Wagner *et al.*, 1996).

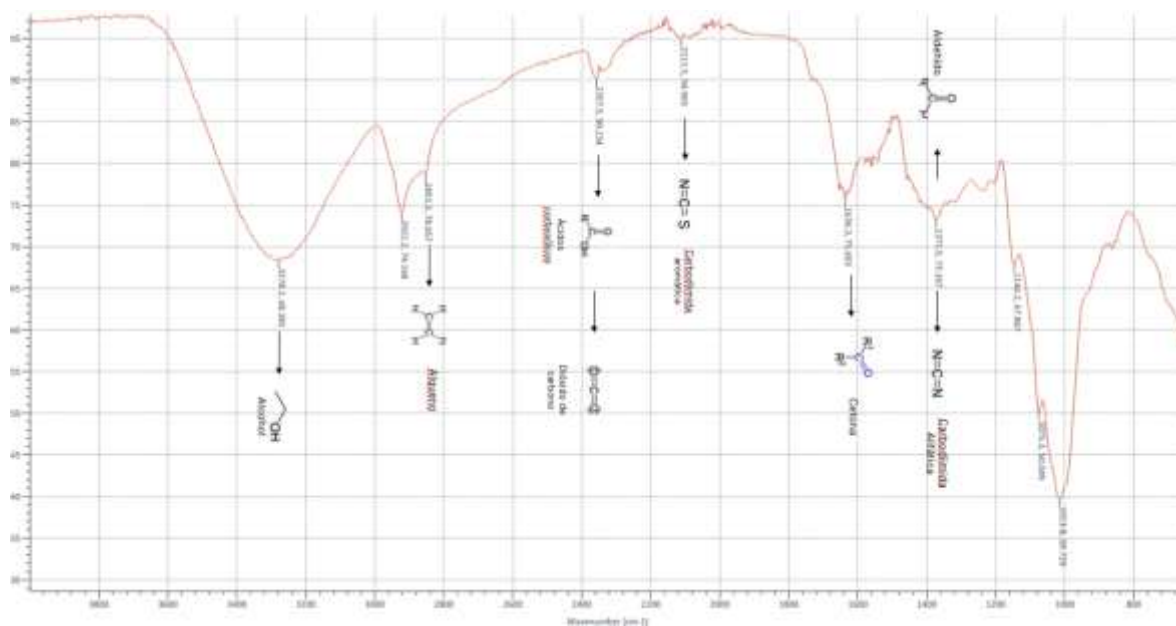


Figura 10. Espectro IR del extracto crudo (control) de *Hericium erinaceus*.

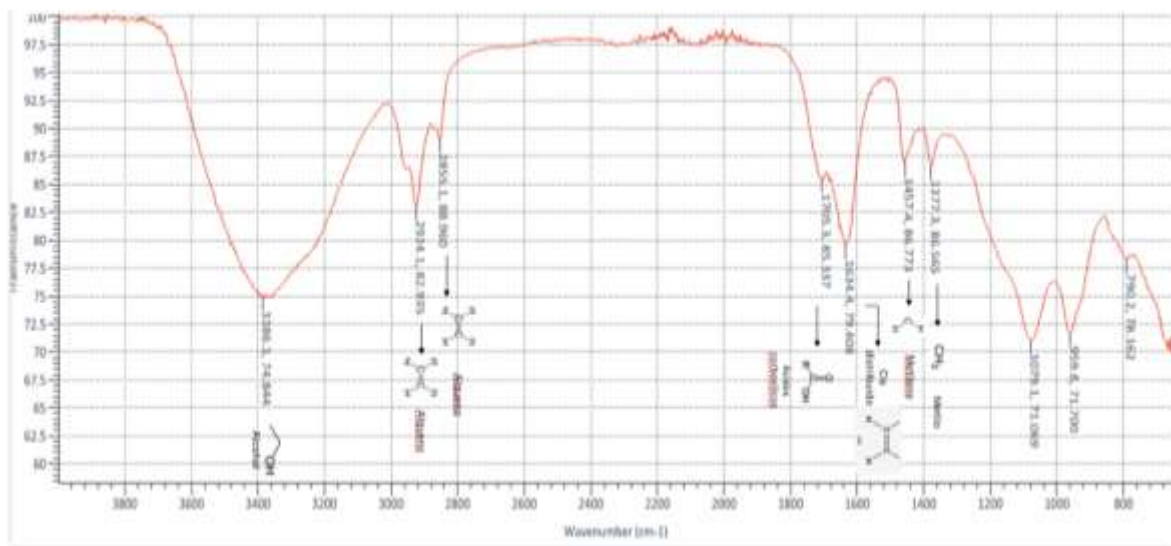


Figura 11. Espectro IR del extracto concentrado “M2” de *Hericium erinaceus*.

8.4.1 Espectroscopia infrarroja (IR)

El análisis por IR evidenció una alta similitud en la distribución funcional de los grupos químicos entre extracto crudo (control) y el extracto concentrado “M2” (Figs. 10 y 11). Sin embargo, se observaron diferencias importantes en la intensidad, definición de bandas y desplazamiento de picos, producto del enriquecimiento molecular tras la concentración por rotavapor.

Ambos espectros presentaron una banda ancha asociada al grupo hidroxilo (-OH), alrededor de 3334.6 cm^{-1} en el control y 3386.7 cm^{-1} en M2, atribuida a compuestos fenólicos, alcoholes y polisacáridos. El desplazamiento hacia frecuencias más altas en M2, junto con un aumento en la intensidad de la banda, sugiere una mayor concentración relativa de metabolitos polares como β -glucanos y ácidos fenólicos, que han sido ampliamente relacionados con propiedades antioxidantes e inmunoestimulantes (Harborne, 1984; Sasidharan *et al.*, 2011).

En la región de $2920\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$, corresponden a estiramientos C-H de cadenas alifáticas, el espectro M2 mostro picos más intensos, lo que apunta a una mayor retención de lípidos estructurales como ergosterol, reconocido por sus efectos inmunomoduladores y su implicación en la permeabilidad celular fúngica (Zhang *et al.*, 2020).

Asimismo, la región entre $1700\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ revelo picos atribuidos a estiramientos C=O y C=C conjugados, característicos de compuestos aromáticos como las hericenonas y otros

terpenoides. El extracto M2 presentó un pico dominante en 1641.5 cm^{-1} indicando una mayor abundancia relativa de estas moléculas neuro activas, cuya capacidad para estimular la síntesis del factor de crecimiento nervioso (NGF) ha sido bien documentada (Sabaratnam *et al.*, 2013, Mizuno, 1999).

Por último, en la región $1200\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$, donde se localizan los enlaces C-O-C y C-OH de polisacáridos, se observó una mayor definición y nitidez en M2, particularmente cerca de 1037.9 cm^{-1} , evidenciando la eficacia del proceso de concentración para preservar compuestos glucídicos de alto peso molecular como los β -glucanos (Wang *et al.*, 2017). En la región $<1000\text{ cm}^{-1}$ conocida como huella digital, se confirmó una mayor limpieza espectral en M2, lo cual sugiere una eliminación significativa de impurezas y un enriquecimiento en metabolitos estructurales.

8.4.2 Resonancia magnética nuclear (^1H -RMN)

El análisis mediante ^1H -RMN complementó y reforzó los hallazgos obtenidos por IR, permitiendo identificar con mayor precisión las estructuras moleculares presentes en el extracto M2 (Fig. 12).

En la región alifática (δ 0.8-4.5 ppm), se detectaron dobletes en δ 0.92 y 1.01 ppm, correspondientes a los protones H-18 y H-19 del ergosterol, metabolito fundamental en la estructura celular de los hongos y potencial modulador inmunológico (Zhang *et al.*, 2020).

Asimismo, la presencia de señales múltiples en δ 1.2-1.4 ppm se relaciona con protones metilénicos de ácidos grasos insaturados como linoleico, de importancia nutracéutica en la dieta funcional (Kusuma *et al.*, 2019).

En la región aromática (δ 6.0-8.0 ppm), se identificó una banda prominente en δ 7.23 ppm, atribuible a hericenona B, así como dobletes en δ 6.82 y 7.45 ppm, asociados a hericenonas A y C, respectivamente (Mizuno, 1999; Li *et al.*, 2022). Estos compuestos han demostrado efectos inmunoestimulantes y protectores frente a estrés oxidativo. La intensidad de estas señales fue particularmente notable en extractos cultivados sobre fibra de coco, coincidiendo con los reportes de Wang *et al.*, (2021), quienes observaron un incremento en estos compuestos en medios con alta celulosa.

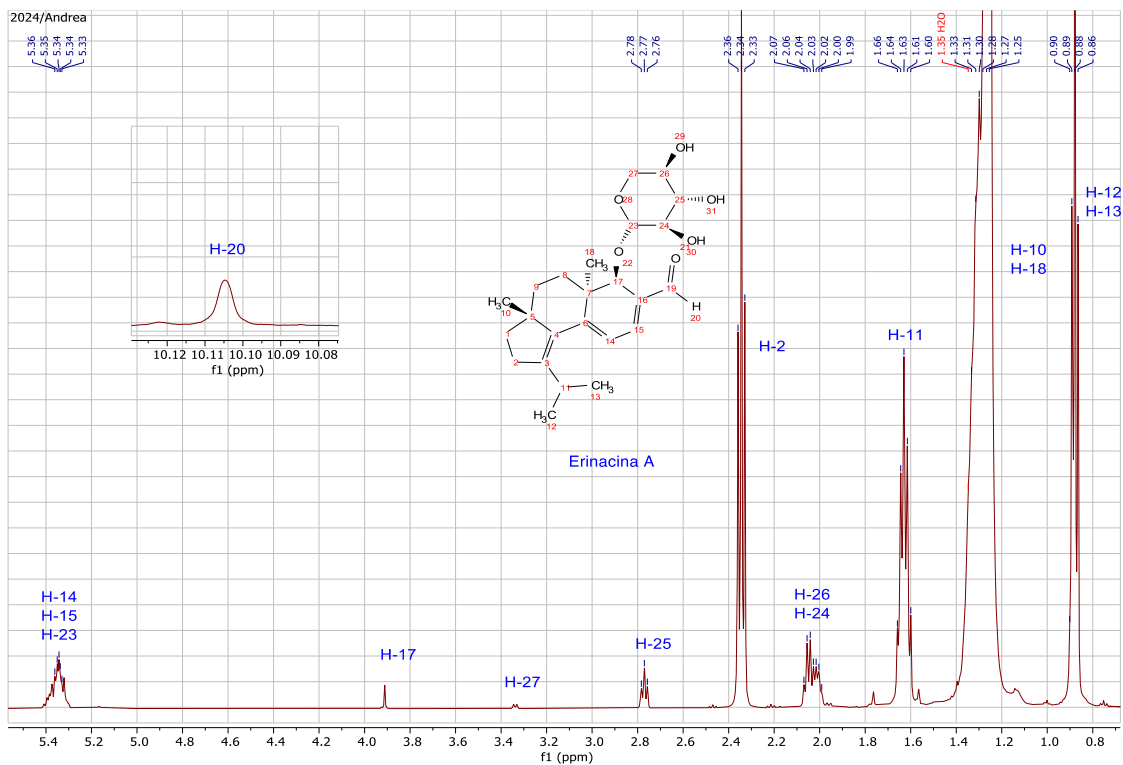


Figura 12. Espectro de ¹H-RMN del extracto M2 de *Hericum erinaceus* cultivado en residuos agrícolas.

Los resultados confirman que el olote de maíz no solo optimizó la productividad de *H. erinaceus*, sino que también favoreció la biosíntesis de compuestos neuro activos (hericenonas y erinacina A), esteroles (ergosterol) y polisacáridos bioactivos. Este patrón concuerda con lo reportado con Chutimanukul *et al.*, (2023), quienes demostraron que los sustratos lignocelulósicos ricos en celulosa y hemicelulosa pueden modular rutas biosintéticas específicas.

En conjunto, el análisis espectroscópico demuestra que la bioconversión de residuos agrícolas como el olote de maíz es una estrategia viable para producir metabolitos de alto valor nutracéutico y terapéutico. La concentración y purificación posteriores no solo preservaron estos metabolitos, sino que optimizaron su detección e identificación, lo que incrementa su potencial de aplicación en la industria farmacéutica y de alimentos funcionales.

IX. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió demostrar que el aprovechamiento de residuos agrícolas, particularmente los rastrojos generados post cosecha, constituye una alternativa técnica y socialmente viable para la producción sustentable de *Hericium erinaceus* en las comunidades de Ocoteppec, Pizarro y Chichicauautla, en el Altiplano Poblano.

La evaluación de la eficiencia biológica, tasa de producción y biodegradación de *H. erinaceus* sobre distintos residuos agrícolas evidenció que la composición lignocelulósica del sustrato influye directamente en el rendimiento y desarrollo del hongo. Los residuos de maíz y trigo mostraron los mejores resultados en productividad y degradación del material, lo que indica un aprovechamiento óptimo de los compuestos estructurales y un potencial adicional para el reciclaje orgánico.

La caracterización química de los cuerpos fructíferos permitió identificar metabolitos bioactivos característicos del género *Hericium*, como polisacáridos, hericenonas y erinacinas, en concentraciones variables según el tipo de residuo utilizado. Los sustratos con mayor contenido de lignina y compuestos fenólicos favorecieron la síntesis de compuestos antioxidantes, demostrando que la naturaleza del sustrato incide en la calidad química y el valor nutracéutico del producto final.

En conjunto, los resultados evidencian que los residuos lignocelulósicos presentes en la región pueden ser revalorizados como sustratos eficientes para el cultivo de *H. erinaceus*, lo cual representa una estrategia ecológica para reducir la quema de residuos, mitigar emisiones contaminantes y mejorar la salud del suelo. Esta alternativa permite transformar un pasivo ambiental en un activo productivo de alto valor nutracéutico y económico.

El diagnóstico participativo reveló que los sistemas agroecológicos implementados por ciertos productores locales presentan mayores niveles de sustentabilidad en comparación con los sistemas convencionales. Atributos como la resiliencia, la equidad, la autogestión y la cohesión social fueron significativamente más robustos en contextos donde se adoptan prácticas regenerativas, como el acolchado con rastrojo, el uso de bioles, así como en aquellos con una mayor inclusión en su organización colectiva.

Asimismo, la implementación de metodologías participativas permitió fomentar una apropiación local del proceso, reconociendo y fortaleciendo los saberes tradicionales de las comunidades campesinas. La construcción conjunta de indicadores de sustentabilidad facilitó

no solo la evaluación de los sistemas, sino también una reflexión crítica y una mejor toma de decisiones enfocadas al mejoramiento de los agroecosistemas.

Adicionalmente, se constató que una producción local de hongos comestibles puede integrarse de manera coherente en estrategias de transición agroecológica y fortalecimiento de la soberanía alimentaria. Esta propuesta no solo contribuye a la diversificación productiva, sino que también fortalece la autonomía económica y alimentaria de las familias rurales, a partir de un uso eficiente de sus propios recursos.

Por último, el modelo propuesto demostró un alto potencial de replicabilidad para otras regiones rurales con condiciones agroecológicas similares. Su carácter integral, adaptable y fundamentado en la participación comunitaria lo posiciona como una estrategia pertinente para avanzar hacia una bioeconomía circular, inclusiva y sustentable, capaz de articular la innovación tecnológica, la justicia socioambiental y la preservación del patrimonio biocultural.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, M., & Corral, S. (2017). Multicriteria decision analysis and participatory decision support systems in forest management. *Forests*, 8(4), 116.

Aggarwal, P., Vyas, S., Thornton, P., Campbell, B. M., & Kropff, M. (2019). Importance of considering technology growth in impact assessments of climate change on agriculture. *Global Food Security*, 23, 41–48.

Aitken, S. C., Pain, R., & Raghuram, P. (2011). *Participatory methods and community development*. Routledge.

Aldana, H., Lozano, F. J., & Acevedo, J. (2014). Evaluating the potential for producing energy from agricultural residues in México using MILP optimization. *Biomass and Bioenergy*, 67, 372–389.

Allen, S. J., & Dawbarn, D. (2006). Clinical relevance of the neurotrophins and their receptors. *Clinical Science*, 110(2), 175–191.

Altieri, M. A. (2018). *Agroecología: bases científicas para una agricultura sustentable*. CLADES.

Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2012). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(3), 529–539.

Ananda, J., & Herath, G. (2009). A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecological Economics*, 68(10), 2535–2548.

Ananda, J., & Herath, G. (2009). A critical review of multi-criteria decision making methods. *Environmental Impact Assessment Review*, 29(6), 339–348.

Appendini, K. (2014). Las agriculturas campesinas en México. *Revista Mexicana de Sociología*, 76(3), 331–360.

Barros, L., Cruz, T., Baptista, P., Estevinho, L. M., & Ferreira, I. C. F. R. (2008). Wild and commercial mushrooms as source of nutrients and nutraceuticals. *Food and Chemical Toxicology*, 46(8), 2742–2747.

- Bederska-Łojewska, D., Świątkiewicz, S., & Muszyńska, B. (2017). The use of Basidiomycota mushrooms in poultry nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 230, 59–69.
- Belton, V., & Stewart, T. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer.
- Bertsch, F. (1995). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Bhandari, D. R., Shen, T., Römpf, A., Zorn, H., & Spengler, B. (2014). Analysis of cyathane-type diterpenoids from *Cyathus striatus* and *Hericium erinaceus*. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 406(3), 695–704.
- Bourdieu, P. (1986). The forms of capital. En J. Richardson (Ed.), *Handbook of theory and research for the sociology of education* (pp. 241–258). Greenwood.
- Brandalise, F., Cesaroni, V., Gregori, A., Repetti, M., Romano, C., Orrù, G., & Rossi, P. (2017). Dietary supplementation of *Hericium erinaceus* increases mossy fiber-CA3 hippocampal neurotransmission. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2017.
- Brechelt, A. (2004). *Manejo ecológico del suelo*. Fundación Agricultura y Medio Ambiente.
- Carrillo-Nieves, D., Rostro, A. M. J., & De la Cruz, Q. R. (2019). Estado actual y tendencias futuras de la producción de bioetanol en México. *Renueva Sust Energ Apocalipsis*, 102, 63–74.
- Cerón, L., Carvajal, Y., & Ávila, A. (2014). Evaluación agroecológica en la microcuena Centella. *Colombia Forestal*, 17(2), 161–179.
- Chambers, R. (2015). *Reinventing participation: From the top-down to the bottom-up*. Routledge.
- Chang, S. T., & Miles, P. G. (1992). Mushroom biology — a new discipline. *Mycologist*, 6(2), 64–65.
- Chang, S. T., & Wasser, S. P. (2017). The cultivation and environmental impact of mushrooms. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*.
- Chaturvedi, V. K., Agarwal, S., Gupta, K. K., Ramteke, P. W., & Singh, M. P. (2018). Medicinal mushroom: Boon for therapeutic applications. *3 Biotech*, 8(8), 334.

- Chen, P., Yong, Y., Gu, Y., Wang, Z., Zhang, S., & Lu, L. (2015). Comparison of antioxidant and antiproliferation activities of polysaccharides from eight species of medicinal mushrooms. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 17(3), 287–295.
- Cheng, J. H., Tsai, C. L., Lien, Y. Y., Lee, M. S., & Sheu, S. C. (2016). High molecular weight polysaccharides from *Hericium erinaceus* against amyloid beta neurotoxicity. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 16, 170.
- Chiu, C. H., Chyau, C. C., Chen, C. C., Lee, L. Y., Chen, W. P., Liu, J. L., & Mong, M. C. (2018). Erinacine A-enriched *Hericium erinaceus* produces antidepressant-like effects. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(2), 341.
- CONAFLOR. (2019). *Gestión de residuos agrícolas y forestales en México*. Comisión Nacional Forestal.
- Convention on Biological Diversity (CBD). (2021). *Global Biodiversity Outlook 5*.
- Cruz, A., Martínez, E., & Roldán, A. (2019). Composición lignocelulósica del rastrojo de maíz y sus usos agroindustriales. *AgroProductividad*, 12(4), 59–66.
- da Eira, A. F., Didukh, M. Y., Stamets, P. E., Wasser, S. P., & de Amazonas, M. A. L. (2002). Is a widely cultivated culinary-medicinal Royal Sun Agaricus indeed *Agaricus blazei* Murrill? *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 4(4).
- Damian-Huato, M. A., Ramírez-Valverde, B., Aragón-García, A., Huerta-Lara, M., Sangerman-Jarquín, D. M., & Romero-Arenas, O. (2010). Manejo del maíz en Tlaxcala: entre lo convencional y lo agroecológico. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(2), 67–76.
- de Castro, F., Hogenboom, B., & Baud, M. (2015). Introducción: Gobernanza ambiental en América Latina. En *Gobernanza ambiental en América Latina* (pp. 11–38).
- de Diego Calonge, F. (2011). *Hongos medicinales*. Ediciones Mundi-Prensa.
- de Kort, E. J. M., & Kamphuis, P. (2011). *United States Patent No. US 2011105594-A1*.
- de Oliveira Nascimento, L., Massari, P., & Wetzler, L. (2012). The role of TLR2 in infection and immunity. *Frontiers in Immunology*, 3, 79.
- Deepalakshmi, K., & Mirunalini, S. (2011). Therapeutic properties and medical usage of *Ganoderma lucidum*. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Research*, 2(8), 1922–1929.
- Diagnóstico local participativo. (2023). Ayuntamiento de Ocotepéc.
- Dillon, J. L. (1980). *Farm management*. Wiley.

- Domínguez-Álvarez, J., Mateos-Vivas, M., Rodríguez-Gonzalo, E., García-Gómez, D., Bustamante-Rangel, M., Delgado Zamarreño, M. M., & Carabias-Martínez, R. (2017). Determination of nucleosides and nucleotides in food samples. *Trends in Analytical Chemistry*, 92, 12–31.
- Duque, A. M., Belmonte, L. J., Plaza, J. A., & Camacho, F. (2020). Agricultural waste biomass in circular economy for greenhouse agriculture in Spain. *Agronomy*, 10(4), 489.
- Escobar, A. (2012). *Cultura y diferencia en América Latina*. Siglo XXI.
- FAO. (1992). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 1992*.
- FAO. (2019). *Agricultural innovation for sustainability*.
- Faúndez, M. (2014). *Análisis geográfico de áreas prioritarias para restauración ecológica en la Isla Robinson Crusoe*[Tesis de grado, Universidad de Chile].
- Florencia Zapata, & Vidal Rondán. (2016). *La investigación-acción participativa: Guía conceptual y metodológica*. Instituto de Montaña.
- Foladori, G. (2002). Avances y límites de la sustentabilidad social. *Economía, Sociedad y Territorio*, 3(12), 621–637.
- Foladori, G. (2002). *Sustentabilidad*. UNAM.
- Friedman, M. (2015). Chemistry and health-promoting properties of *Hericium erinaceus*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(32), 7108–7123.
- Furukawa, Y., Furukawa, S., Ikeda, F., & Satoyoshi, K. (1986). Aliphatic side chain effects on nerve growth factor synthesis. *FEBS Letters*, 208, 258–262.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz-Gaistardo, C., Encina Rojas, A., ... Brefin, M. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea.
- Garibay-Orijel, R., Caballero, J., Estrada-Torres, A., & Cifuentes, J. (2017). Understanding cultural significance: Edible mushrooms case. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 3, 1–18.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. UNAM.
- Geilfus, F. (2009). *80 herramientas para el desarrollo participativo*. IICA.
- Giannuzzo, A. N. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental. *Scientiae Studia*, 8, 129–156.

- González, J. L. S. S., Abad, P. G., Korn, F. R., & Romero, N. S. (2016). Diagnóstico institucional del proyecto de seguridad alimentaria en Puebla. *Teorías, Enfoques y Aplicaciones en las Ciencias Sociales*, 9(19), 93–112.
- González, M., Plascencia, O., & Martínez-Trinidad, T. (2016). Áreas prioritarias para restauración ecológica en Chignahuapan-Zacatlán. *Madera y Bosques*, 22(2), 41–52.
- González-López, M., García, E., & Palacios, J. (2020). Composición y uso del rastrojo de maíz en sistemas campesinos. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 451–460.
- Graeber, D., Boëchat, I. G., Encina-Montoya, F., Esse, C., Gelbrecht, J., Goyenola, G., ... Zwirnmann, E. (2015). Global effects of agriculture on fluvial dissolved organic matter. *Scientific Reports*, 5, 16328.
- Guzmán, G. (2015). New studies on hallucinogenic mushrooms. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 11(17).
- Harborne, J. (1984). *Phytochemical methods*. Chapman & Hall.
- Harris, D. (2007). *Análisis químico cuantitativo* (Vol. 1). Grupo Editorial Iberoamérica.
- Havrysh, V., Kalinichenko, A., Brzozowska, A., & Stebila, J. (2021). Agricultural waste management for sustainable energy: Poland case. *Applied Sciences*, 11(13), 5907.
- Hiwatashi, K., Kosaka, Y., Suzuki, N., Hata, K., Mukaiyama, T., Sakamoto, K., & Komai, M. (2010). *Hericium erinaceus* improves lipid metabolism in mice. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 74(7), 1447–1451.
- Hu, G., & Yang, F. Q. (2014). Biological activities of nucleosides in dietary foods. *Chemical Rapid Communications*, 2, 22–28.
- INECC. (2021). *Programas comunitarios de compostaje en Oaxaca*.
- INEGI. (2009). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Ocoteppec, Puebla*.
- Izydorczyk, M. (2005). *Understanding the chemistry of food carbohydrates* (Vol. 327). CRC Press.
- Jensen, L. (2019). *Informe sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*. Naciones Unidas.
- 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.

- Kangas, A., Kangas, J., & Kurttila, M. (2008). Decision support for forest management. Springer.
- Kawagishi, H., Ando, M., & Mizuno, T. (1990). Hericenone A and B as cytotoxic principles from the mushroom *Hericium erinaceus*. *Tetrahedron Letters*, 31(3), 373–376.
- Kawagishi, H., Ando, M., Sakamoto, H., Yoshida, S., Ojima, F., Ishiguro, Y., & Furukawa, S. (1991). Hericenones C, D and E, stimulators of nerve growth factor (NGF)-synthesis, from the mushroom *Hericium erinaceus*. *Tetrahedron Letters*, 32(35), 4561–4564.
- Kawagishi, H., Ando, M., Shinba, K., Sakamoto, H., Yoshida, S., Ojima, F., & Furukawa, S. (1992). Chromans, hericenones F, G and H from the mushroom *Hericium erinaceus*. *Phytochemistry*, 32(1), 175–178.
- Kawagishi, H., Masui, A., Tokuyama, S., & Nakamura, T. (2006). Erinacines J and K from the mycelia of *Hericium erinaceus*. *Tetrahedron*, 62(36), 8463–8466.
- Kawagishi, H., Mori, H., Uno, A., Kimura, A., & Chiba, S. (1994). A sialic acid-binding lectin from the mushroom *Hericium erinaceus*. *FEBS Letters*, 340(1-2), 56–58.
- Kawagishi, H., Shimada, A., Shirai, R., Okamoto, K., Ojima, F., Sakamoto, H., & Furukawa, S. (1994). Erinacines A, B and C, strong stimulators of NGF-synthesis, from the mycelia of *Hericium erinaceus*. *Tetrahedron Letters*, 35(10), 1569–1572.
- Kawagishi, H., Shimada, A., Shizuki, K., Mori, H., Okamoto, K., Sakamoto, H., & Furukawa, S. (1996). Erinacine D, a stimulator of NGF-synthesis, from the mycelia of *Hericium erinaceus*. *Heterocyclic Communications*, 2(1), 51–54.
- Kay, C. (2001). Los paradigmas del desarrollo rural en América Latina. En *El mundo rural en la era de la globalización: incertidumbres y potencialidades* (pp. 337–430).
- Kenmoku, H., Kato, N., Shimada, M., Omoto, M., Mori, A., Mitsuhashi, W., & Sassa, T. (2001). Isolation of (–)-cyatha-3,12-diene, a common biosynthetic intermediate of cyathane diterpenoids, from an erinacine-producing basidiomycete, *Hericium erinaceus*. *Tetrahedron Letters*, 42(42), 7439–7442.
- Kenmoku, H., Shimai, T., Toyomasu, T., Kato, N., & Sassa, T. (2002). Erinacine Q, a new erinacine from *Hericium erinaceus*, and its biosynthetic route to erinacine C in the basidiomycete. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 66(3), 571–575.

Kim, S. P., Nam, S. H., & Friedman, M. (1999). *Hericium erinaceus* enhances antioxidant properties in various organs of mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(10), 3822–3825.

La Para, T. M., Alleman, J. E., & Pope, P. G. (2000). Miniaturized closed reflux, colorimetric method for determination of chemical oxygen demand. *Waste Management*, 20(4), 295–298.

Lander, E. (2000). Ciencias sociales: saberes coloniales y eurocéntricos. En *Saberes coloniales y eurocéntricos* (pp. 11–40). CLACSO.

Lee, D. G., Kang, H. W., Park, C. G., Ahn, Y. S., & Shin, Y. (2016). Isolation and identification of phytochemicals and biological activities of *Hericium erinaceus* strains by HPLC/UV. *Journal of Ethnopharmacology*, 184, 219–225.

Lee, E. W., Shizuki, K., Hosokawa, S., Suzuki, M., Suganuma, H., Inakuma, T., & Kawagishi, H. (2000). Two novel diterpenoids, erinacines H and I, from the mycelia of *Hericium erinaceus*. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 64(11), 2402–2405.

Leff, E. (2007). La complejidad ambiental. *Polis: Revista Latinoamericana*, 16, 4.

Leff, E., Argueta, A., Boege, E., & Gonçalves, C. W. P. (2003). Más allá del desarrollo sostenible: una visión desde América Latina. *Medio Ambiente y Urbanización*, 59(1), 65–108.

Li, G., Yu, K., Li, F., Xu, K., Li, J., He, S., & Tan, G. (2014). Anticancer potential of *Hericium erinaceus* extracts against gastrointestinal cancers. *Journal of Ethnopharmacology*, 153(2), 521–530.

Li, Y., Zhang, G., Ng, T. B., & Wang, H. (2010). A novel lectin with antiproliferative and HIV-1 reverse transcriptase inhibitory activities from dried fruiting bodies of *Hericium erinaceus*. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2010, Article ID 123482.

Lin, C. Y., Chen, Y. J., Hsu, C. H., Lin, Y. H., Chen, P. T., Kuo, T. H., Ho, C. T., Chen, H. H., Huang, S. J., Chiu, H. C., Chen, C. C., & Hwang, E. (2023). Erinacine S from *Hericium erinaceus* mycelium promotes neuronal regeneration by inducing neurosteroid accumulation. *Journal of Food and Drug Analysis*, 31(1), 32–54. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3446>

Lindequist, U. (2011). The impact of ethnomycology on modern pharmacy. *Curare*, 34(1-2), 118–123.

- Lucas, E. H., Ringler, R. L., Byerrum, R. U., Stevens, J. A., Clarke, D. A., & Stock, C. C. (1957). Tumor inhibitors in *Boletus edulis* and other holobasidiomycetes. *Antibiotics & Chemotherapy*, 1(7).
- Ma, B. J., Yu, H. Y., Shen, J. W., Ruan, Y., Zhao, X., Zhou, H., & Wu, T. T. (2010). Cytotoxic aromatic compounds from *Hericium erinaceus*. *Journal of Antibiotics*, 63(12), 713–715.
- Ma, B. J., Zhou, Y., Li, L. Z., Li, H. M., Gao, Z. M., & Ruan, Y. (2008). A new cyathane-xyloside from the mycelia of *Hericium erinaceus*. *Zeitschrift für Naturforschung B*, 63(10), 1241–1242.
- Mallerman, J. (2017). *Degradación de restos vegetales y nonilfenol etoxilado por hongos lignocelulolíticos de hojarasca*[Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires].
- Martínez, S. D. C. B., García, T. R., Ramos, P. A., Espinosa, K. P. A., & López, M. G. M. (Año desconocido). Agricultura y seguridad alimentaria en tzotziles de Chayomté, Chiapas. En *Alimentación sustentable en Chiapas: hoy y mañana* (p. 33).
- Martínez-Castro, C. J., Ríos, M., & Castillo, M. (2015). Propuesta para evaluar la sustentabilidad en agroecosistemas de piña. *Cathedra et Scientia*, 1(2), 63–80.
- Masera, O., Astier, M., & López-Ridaura, S. (1999). *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: El marco de evaluación MESMIS*. GIRA A.C.
- McFadden, D. (1978). The cost of production and selection. *International Economic Review*, 19(1), 15–54.
- Méndez, R. M., Pérez, L. M. S., & Montes, C. A. C. (2001). Proceso de recolección y comercialización de hongos comestibles silvestres en el Valle de Toluca. *CIENCIA ergo-sum*, 8(1), 30–40.
- Mengqi, Z., Shi, A., Ajmal, M., Ye, L., & Awais, M. (2023). Agricultural waste utilization and high-temperature fermentation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(7), 5445–5468.
- Methacanon, P., Madla, S., Kirtikara, K., & Prasitsil, M. (2005). Structural elucidation of bioactive fungi-derived polymers. *Carbohydrate Polymers*, 60(2), 199–203.
- Meyer, B. (2010). *Thin layer chromatography: A modern guide*. Springer.
- Mizuno, T. (1999). Bioactive biomolecules of mushrooms. *Food Reviews International*, 11(1), 5–21.

- Molina-Guerrero, C. E., Sánchez, A., & Vázquez-Núñez, E. (2020). Energy potential of agricultural residues in Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 28607–28622.
- Montagnini, F., & Metzel, R. (2017). The contribution of agroforestry to SDG-2. En *Integrating landscapes: Agroforestry for biodiversity and food sovereignty* (pp. 11–45).
- NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007. (2007). Manejo del fuego en terrenos agropecuarios. <https://www.dof.gob.mx>
- Nicholls, C. I., Altieri, M. A., & Vásquez, L. (2016). Agroecology: Principles for redesigning farming systems. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40(3), 187–206.
- Obara, Y., Nakahata, N., Kita, T., Takaya, Y., Kobayashi, H., & Oshima, Y. (1999). Scabronines A and G stimulate neurotrophic factor secretion. *European Journal of Pharmacology*, 370, 79–84.
- Obara, Y., & Nakahata, N. (2002). The signaling pathway of neurotropic factor. *Drug News & Perspectives*, 15, 290–298.
- OCDE. (2021). *Environmental performance review: Mexico*. OECD Publishing.
- ONU-GIEC (2019). *Cambio climático y tierra: Resumen para responsables de políticas*. IPCC.
- Organización de las Naciones Unidas. (1987). *Nuestro futuro común*. Informe Brundtland.
- Ortega, A., Gómez, F., & Aguilar, J. (2016). Sistemas agrícolas tradicionales en Puebla. *Revista de Agroecología*, 28(2), 45–58.
- Ortiz, M., Astier, M., & Masera, O. (2017). Adaptación del MESMIS para evaluaciones regionales. *Agroecología*, 12(1), 27–38.
- Ortiz, T., Quiroz, A., & Migoya, C. (2017). *Evaluación de la sustentabilidad para el manejo de sistemas naturales*. UNAM.
- Ostrom, E. (2009). *Governing the commons*. Cambridge University Press.
- Payá, A. (2006). *Fundamentos y funciones de la espectrometría de masa*. Universidad de Valencia.
- Phan, C. W., Tan, E. Y. Y., & Sabaratnam, V. (2018). Bioactive molecules in mushrooms. En *Bioactive molecules in food*(pp. 1–24).

- Phan, C. W., Wang, J. K., Cheah, S. C., Naidu, M., David, P., & Sabaratnam, V. (2018). Nucleic acid constituents in mushrooms. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(5), 762–777.
- Pro-México. (2014). *Programa especial de producción y consumo sustentable (PEPyCS)*.
- Qin, Y., Zhang, Z., Song, T., & Lv, G. (2017). Optimization of enzyme-assisted extraction of antitumor polysaccharides from *Hericium erinaceus*. *Food Science and Technology Research*, 23(1), 31–39.
- Ranogajec, A., Beluhan, S., & Šmit, Z. (2010). Analysis of nucleosides and monophosphate nucleotides in mushrooms. *Journal of Separation Science*, 33(8), 1024–1033.
- Rathore, H., Prasad, S., & Sharma, S. (2017). Mushroom nutraceuticals for improved nutrition. *PharmaNutrition*, 5(2), 35–46.
- Reyes, A., Torres, F., & Molina, J. (2019). Métodos de investigación participativa en comunidades rurales. *Desarrollo Rural*, 45(2), 85–102.
- Ren, J., Yu, P., & Xu, X. (2019). Straw use in China: Status and recommendations. *Sustainability*, 11(6), 1762.
- Riaz, A., Lei, S., Akhtar, H. M. S., Wan, P., Chen, D., Jabbar, S., Abid, M., Hashim, M. M., & Zeng, X. (2018). Chitosan-based antimicrobial packaging with apple peel polyphenols. *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 547–555.
- Romero-Arenas, O., Ita, V. D., Ángeles, M., Rivera-Tapia, J. A., Tello-Salgado, I., Villarreal-Espino-Barros, O. A., & Damián-Huato, M. A. (2018). Capacidad productiva de *Pleurotus ostreatus* con alfalfa deshidratada. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15(2), 145–160.
- Romero, O., Huerta, M., Damián, M. A., Macías, A., Tapia, A. M., Parraguirre, J. F., & Juárez, J. (2010). *Pleurotus ostreatus* con hoja de plátano deshidratada. *Agronomía Costarricense*, 34(1), 53–63.
- Romero-Sáez, M. (2022). Los residuos agroindustriales: oportunidad para la economía circular. *TecnoLógicas*, 25(54).
- Rosset, P. M., & Altieri, M. A. (2017). *Agroecology: Science and politics*. Fernwood Publishing.
- SADER. (2020). *Informe anual de producción agrícola en México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura>
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176.

- Sadh, P. K., Duhan, S., & Duhan, J. S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid-state fermentation: A review. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), 1–15.
- SAGARPA. (2020). *Casos exitosos de biodigestores en México*. Secretaría de Agricultura.
- SAGARPA-SIAP. (2020). *Situación actual y perspectivas de México 2020*. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp
- Saito, T., Aoki, F., Hirai, H., Inagaki, T., Matsunaga, Y., Sakakibara, T., & Kojima, N. (1998). Erinacine E as a kappa opioid receptor agonist from *Hericium ramosum*. *Journal of Antibiotics*, 51(11), 983–990.
- Sánchez-Cohen, I., et al. (2015). Rastrojo y humedad del suelo en agricultura de temporal. *Agrociencia*, 49(6), 605–617.
- Sánchez-Fernández, R. E., Sánchez-Ortiz, B. L., Sandoval-Espinosa, Y. K. M., Ulloa-Benítez, Á., Armendáriz-Guillén, B., García-Méndez, M. C., & Macías-Rubalcava, M. L. (2013). Hongos endófitos: fuente potencial de metabolitos bioactivos. *TIP Revista especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 16(2), 132–146.
- Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (2009). Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: una propuesta metodológica. *Agroecología*, 4, 19–28.
- Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (2009). *Agroecología: El camino hacia una agricultura sustentable*. Ediciones Científicas.
- SEDATU. (2018). *Programa subregional para el desarrollo del Altiplano Poblano*. Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano.
- SEMARNAT. (2021). *Inventario Nacional de Emisiones 2021*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat>
- SIAP-SAGARPA. (2022). *Anuario estadístico de producción agrícola*. <https://www.siap.gob.mx>
- Studzińska, S., & Buszewski, B. (2013). Effect of mobile phase pH on nucleotide retention in HPLC. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 405(5), 1663–1672.
- Tagkouli, D., Kaliora, A., Bekiaris, G., Koutrotsios, G., Christea, M., Zervakis, G. I., & Kalogeropoulos, N. (2020). Free amino acids in *Pleurotus* species grown on agro-industrial by-products. *Molecules*, 25(17), 4015.
- Takano, M., Umino, A., & Nakad, M. (2004). Enantioselective total synthesis of (+)-alloycathin B2. *Organic Letters*, 26, 4897–4900.

- Thiele-Bruhn, S. (2020). Soil microbiological functioning. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(2), 123–145.
- Thongbai, B., Rapior, S., Hyde, K. D., Wittstein, K., & Stadler, M. (2015). *Hericium erinaceus*: An amazing medicinal mushroom. *Mycological Progress*, 14(10).
- Toledo, V. M. (2017). Etnoecología: bases teóricas y aplicaciones. *Revista de Antropología Social*, 26(1), 11–30.
- Turrent, A., Wise, T., & Garvey, E. (2014). *La Estrategia MasAgro: Análisis crítico*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Uauy, R., Quan, R., & Gil, A. (1994). Role of nucleotides in intestinal development and repair. *The Journal of Nutrition*, 124(8 Suppl), 1436S–1441S.
- Van Buren, C. T., & Rudolph, F. (1997). Dietary nucleotides as a conditional requirement. *Nutrition*, 13(5), 470–472.
- Van der Ploeg, J. D. (2014). *Peasants and the art of farming*. Fernwood Publishing.
- Van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber in animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583–3597.
- Varghese, S. A., Pulikkalparambil, H., Promhuad, K., Srisa, A., Laorenza, Y., Jarupan, L., ... & Harnkarnsujarit, N. (2023). Renovation of agro-waste for sustainable food packaging: A review. *Polymers*, 15(3), 648.
- Vázquez-Rowe, I., Villanueva-Rey, P., & Moreira, M. T. (2016). LCA of agro-industrial residues. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3579–3591.
- Vía Campesina. (2003). *Declaración de la soberanía alimentaria*.
- Villalobos-Robles, L. A., & Kuroda, K. (2023). Biogas production from *Sargassum ilicifolium*. *European Journal of Sustainable Development Research*, 7(2).
- Volonté, M. G. (2013). *Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)*. Libros de Cátedra.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1996). *Our ecological footprint*. New Society Publishers.
- Wagner, H., Bladt, S., & Zgainski, E. (1996). *Plant drug analysis*. Springer.
- Wang, L., et al. (2017). FTIR analysis of fungal metabolites. *Spectrochimica Acta Part A*, 173, 986–994.

- Wang, M., Zhang, Y., Xiao, X., Xu, D., Gao, Y., & Gao, Q. (2017). *Hericium erinaceus* polysaccharide induces apoptosis in gastric precancerous cells. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 19(12).
- Wani, B. A., Bodha, R. H., & Wani, A. H. (2010). Nutritional and medicinal importance of mushrooms. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4(24), 2598–2604.
- Wasser, S. P. (2011). Current findings and future trends in medicinal mushroom studies. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89(5), 1323–1331.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., & David, C. (2009). Agroecology as a science, movement and practice. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 503–515.
- Wright, D. L., & Whitehead, C. R. (2000). Progress on the synthesis of cyathane diterpenes. *Organic Preparations and Procedures International*, 32, 307–331.
- Yamamoto, S., Wang, M. F., Adjei, A. A., & Ameho, C. K. (1997). Role of nucleosides and nucleotides in the immune system. *Nutrition*, 13(4), 372–374.
- Yassi, A., Kjellstrom, T., De Kok, T., & Guidotti, T. (2002). *Salud ambiental básica*. PNUMA.
- Yu, Q., Liu, R., Li, K., & Ma, R. (2019). Crop straw pretreatment for biogas production in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 51–58.
- Zaidman, B. Z., Yassin, M., Mahajna, J., & Wasser, S. P. (2005). Mushroom modulators of molecular targets as cancer therapeutics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67(4), 453–468.
- Zan, X., Cui, F., Li, Y., Yang, Y., Wu, D., Sun, W., & Ping, L. (2015). *Hericium erinaceus* polysaccharide-protein HEG-5 induces apoptosis in SGC-7901 cells. *International Journal of Biological Macromolecules*, 76, 242–253.
- Zapata, F., & Vidal, R. (2016). *La investigación-acción participativa: Guía conceptual y metodológica*. Instituto de Montaña.
- Zhang, A. Q., Sun, P. L., Zhang, J. S., Tang, C. H., Fan, J. M., Shi, X. M., & Pan, Y. J. (2007). Structural investigation of a fucoglucogalactan from *Hericium erinaceus*. *Food Chemistry*, 104(2), 451–456.
- Zhang, M., Cui, S. W., Cheung, P. C. K., & Wang, Q. (2007). Antitumor polysaccharides from mushrooms: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(1), 4–19.
- Zhang, M.-Q., & Wilkinson, B. (2007). Drug discovery beyond the ‘rule-of-five’. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(6), 478–488.

Zhang, Y., Liu, L., Bao, L., Yang, Y., Ma, K., & Liu, H. (2018). Cyathane diterpenes with neurotrophic activity from *Hericium erinaceus*. *Journal of Antibiotics*, 71(9), 818–821.

Zhang, Y., et al. (2020). Infrared spectroscopy of *Hericium* spp. *Journal of Food Biochemistry*, 44(3), e13124.

Zhu, Y., Chen, Y., Li, Q., Zhao, T., Zhang, M., Feng, W., & Wu, X. (2014). Anti-*Helicobacter pylori* activity of Bi³⁺-*Hericium erinaceus* polysaccharide complex. *Carbohydrate Polymers*, 110, 231–237.
