

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

“Efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina - 2024”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AUTOR: Rivera Ventura, Patrick Anthony

ASESOR: Cámara Llanos, Frank Erick

HUÁNUCO – PERÚ

2025

U

TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

- Tesis (X)
- Trabajo de Suficiencia Profesional ()
- Trabajo de Investigación ()
- Trabajo Académico ()

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Contaminación Ambiental
AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN (2020)

CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Ingeniería ambiental

Disciplina: Ingeniería ambiental y geológica

DATOS DEL PROGRAMA:

Nombre del Grado/Título a recibir: Título

Profesional de Ingeniero(a) ambiental

Código del Programa: P09

Tipo de Financiamiento:

- Propio (X)
- UDH ()
- Fondos Concursables ()

D

DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 75548867

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 44287920

Grado/Título: Maestro en ciencias de la salud con
 mención en: salud pública y docencia universitaria

Código ORCID: 0000-0001-9180-7405

DATOS DE LOS JURADOS:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Tarazona Mirabal, Herman Atilio	Maestro en gestión y planeamiento educativo	22411008	0000-0001-5319-4708
2	Córdova Antaurco, Miller Harvín	Maestro en Ingeniería de sistemas e informática con mención en gerencia de sistemas y tecnologías de la información	44114162	0009-0006-9014-7437
3	Condezo Beteta, Verenisa Nohely	Maestro en Investigación y docencia superior	45728462	0009-0001-8221-7427

H



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) AMBIENTAL

En la ciudad de Huánuco, siendo las 16:00 horas del día 22 del mes de mayo del año 2025, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron el sustentante y el **Jurado Calificador** integrado por los docentes:

- Mg. Herman Atilio Tarazona Mirabal (Presidente)
- Mg. Miller Harvín Córdova Antaurco (Secretario)
- Mg. Verenisa Nohely Condezo Beteta (Vocal)

Nombrados mediante la **Resolución N° 0926-2025-D-FI-UDH**, para evaluar la Tesis intitulada: **"EFECTO MICORREMEDIAADOR DE LA SETA *Agaricus bisporus* SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO CONTAMINADO POR PLOMO EN LA LOCALIDAD DE HUANCAMINA - 2024"**, presentado por el (la) Bach. RIVERA VENTURA, PATRICK ANTHONY; para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental.

Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas; procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) APROBADO Por UNANIMIDAD con el calificativo cuantitativo de 15 y cualitativo de BUENO (Art. 47)

Siendo las 5:00pm horas del día 22 del mes de MAYO del año 2025, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.

Mg. Herman Atilio Tarazona Mirabal
DNI: 22411008
ORCID: 0000-0001-5319-4708
Presidente

Mg. Miller Harvín Córdova Antaurco
DNI: 44114162
ORCID: 0009-0006-9014-7437
Secretario

Mg. Verenisa Nohely Condezo Beteta
DNI: 45728462
ORCID: 0009-0001-8221-7427
Vocal



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El comité de integridad científica, realizó la revisión del trabajo de investigación del estudiante: PATRICK ANTHONY RIVERA VENTURA, de la investigación titulada "Efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina - 2024", con asesor(a) FRANK ERICK CAMARA LLANOS, designado(a) mediante documento: RESOLUCIÓN N° 1335-2024-D-FI-UDH del P. A. de INGENIERÍA AMBIENTAL.

Puede constar que la misma tiene un índice de similitud del 23 % verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Turnitin.

Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Huánuco, 22 de abril de 2025



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

123. Rivera Ventura, Patrick Anthony.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%
INDICE DE SIMILITUD

23%
FUENTES DE INTERNET

4%
PUBLICACIONES

9%
TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	espanol.libretexts.org Fuente de Internet	2%
4	cideteq.repositorioinstitucional.mx Fuente de Internet	2%
5	repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet	1%



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

DEDICATORIA

A mis padres Carlos y Yolanda, por su amor incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación.

A mi hermano Erik, mi compañero de vida, por su apoyo y las risas compartidas que hacen todo más ligero.

Y a mi fiel gato Baddy, por ser mi refugio de paz y el mejor recordatorio de que las cosas simples son las que más llenan el corazón.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mis padres por su amor, paciencia y apoyo incondicional, que siempre han estado presentes en cada paso que he dado, permitiéndome llegar hasta aquí con fuerza y determinación.

A mi hermano, por ser mi cómplice en los momentos difíciles, por sus palabras de aliento y por ser mi fuente constante de motivación, ayudándome a seguir adelante cuando más lo necesitaba.

Y, finalmente, agradezco a la vida por las lecciones aprendidas, las oportunidades que se me han presentado y por cada experiencia que me ha hecho más fuerte y sabio.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	X
INTRODUCCIÓN.....	XI
CAPÍTULO I.....	13
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2.1. PROBLEMA GENERAL.....	15
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	15
1.3. OBJETIVOS	15
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
1.4.1. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	16
1.4.2. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	16
1.4.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL.....	17
1.4.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL.....	17
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.6. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	18
CAPÍTULO II.....	19
MARCO TEÓRICO	19
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	19

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	19
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	25
2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES	28
2.2. BASES TEÓRICAS	28
2.2.1. MICORREMEDIACIÓN.....	28
2.2.2. CALIDAD DE SUELO	39
2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES.....	51
2.4. HIPÓTESIS	53
2.5. VARIABLES	53
2.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE	53
2.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE	53
2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	54
CAPÍTULO III	55
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	55
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	55
3.1.1. Enfoque	55
3.1.2. Alcance o Nivel	55
3.1.3. Diseño.....	55
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	56
3.2.1. Población	56
3.2.2. Muestra.....	56
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS ...	56
3.3.1. Protocolo de trabajo.....	57
3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	58
CAPÍTULO IV.....	59
RESULTADOS.....	59

4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	59
4.2. PRUEBA Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	63
CAPÍTULO V.....	67
DISCUSIÓN	67
5.1. DISCUSIÓN DEL OBJETIVO GENERAL.....	67
5.2. DISCUSIÓN DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS	68
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES.....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
ANEXOS	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estándares de calidad ambiental del suelo.....	49
Tabla 2 Operacionalización de variables	54
Tabla 3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	56
Tabla 4 Niveles de plomo según análisis	59
Tabla 5 Descripción del porcentaje de plomo del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i>	59
Tabla 6 Descripción de las propiedades físicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i>	60
Tabla 7 Descripción de las propiedades químicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i>	61
Tabla 8 Prueba de normalidad de los datos con Kolmogorov-Smirnov	62
Tabla 9 Prueba de hipótesis con ANOVA con un factor intersujetos	63
Tabla 10 Evolución del plomo	64
Tabla 11 Prueba de hipótesis con ANOVA con un factor intersujetos	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo del <i>Agaricus bisporus</i>	32
Figura 2 Diferencia entre un hongo y una seta	33
Figura 3 Clases texturales del suelo	41
Figura 4 Descripción del porcentaje de plomo del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i>	60
Figura 5 Reducción del plomo	64

RESUMEN

En el centro poblado de Huancamina, distrito de Jacas Chico, provincia de Yarowilca, región de Huánuco, se realizó la extracción de suelo contaminado para la investigación titulada: “Efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina - 2024”, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto micorremediador del hongo *Agaricus bisporus* sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina. Para ello, se recolectaron muestras de suelo de cuatro parcelas con niveles elevados de plomo, utilizando calicatas para obtener un total de 81 kg de suelo, de los cuales se seleccionaron 13 kg por parcela para realizar el análisis inicial. Los suelos fueron tratados en macetas donde se sembraron semillas de *Agaricus bisporus* en diferentes cantidades (10, 20, 30 y 40 gramos por maceta), con el fin de evaluar el efecto de distintas dosis del hongo. Las macetas fueron selladas para mantener las condiciones de humedad y optimizar el crecimiento del hongo durante un mes. *El Agaricus bisporus*, en presencia de plomo, absorbe y acumula el metal dentro de sus tejidos (principalmente en el micelio), como una forma de defensa, lo que contribuye a la reducción de la concentración de este metal en el sustrato. Al finalizar el periodo de crecimiento, se tomaron nuevas muestras para el análisis post-test, permitiendo así evaluar los cambios en la concentración de plomo en el suelo. Los resultados mostraron que el hongo fue altamente efectivo en la reducción de plomo, logrando una disminución de hasta un 71.5% en los niveles de contaminación, debido a que, el análisis estadístico mediante pruebas ANOVA confirmó las existencias significativas en la calidad del suelo antes y después del tratamiento en los distintos grupos con p-valor <0.05, respaldando el efecto del *Agaricus bisporus* en la reducción de plomo y mejora de la calidad del suelo. Se concluyó que la aplicación del *Agaricus bisporus* demostró ser una alternativa altamente efectiva para la rehabilitación de suelos contaminados por metales pesados, favoreciendo la restauración ecológica de áreas afectadas por la contaminación.

Palabras clave: Micorremediación, *Agaricus bisporus*, Plomo, Bioacumulación, Adsorción.

ABSTRACT

In the town center of Huancamina, district of Jacas Chico, province of Yarowilca, region of Huánuco, the extraction of contaminated soil was carried out for the research titled: "Mycoremediating effect of the mushroom *Agaricus bisporus* on the quality of soil contaminated by lead in the town of Huancamina - 2024", the objective of this study was to evaluate the mycoremediating effect of the fungus *Agaricus bisporus* on soil quality contaminated by lead in the town of Huancamina. To do this, soil samples were collected from four plots with elevated lead levels, using pit pits to obtain a total of 81 kg of soil, of which 13 kg per plot were selected to perform the initial analysis. The soils were treated in pots where *Agaricus bisporus* seeds were sown in different quantities (10, 20, 30 and 40 grams per pot), in order to evaluate the effect of different doses of the fungus. The pots were sealed to maintain humidity conditions and optimize fungal growth for one month. *Agaricus bisporus*, in the presence of lead, absorbs and accumulates the metal within its tissues (mainly in the mycelium), as a form of defense, which contributes to the reduction of the concentration of this metal in the substrate. At the end of the growing period, new samples will be taken for post-test analysis, thus allowing changes in the concentration of lead in the soil to be evaluated. The results showed that the fungus was highly effective in reducing lead, achieving a decrease of up to 71.5% in contamination levels, because the statistical analysis using ANOVA tests confirmed the significant existence in soil quality before and after treatment in the different groups with p-value <0.05, supporting the effect of *Agaricus bisporus* in reducing lead and improving soil quality. It was concluded that the application of *Agaricus bisporus* proved to be a highly effective alternative for the rehabilitation of soils contaminated by heavy metals, favoring the ecological restoration of areas affected by contamination.

Keywords: Mycoremediation, *Agaricus bisporus*, Lead, Bioaccumulation, Adsorption.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo por metales pesados es un problema ambiental de gran preocupación en diversas regiones del mundo, incluido el Perú. En la localidad de Huancamina, en la ciudad de Huánuco, la presencia de plomo en el suelo representa una amenaza significativa para la salud humana y el equilibrio ecológico. Este problema surge principalmente debido a actividades industriales y mineras que han liberado contaminantes al ambiente sin un control adecuado, provocando que los suelos acumulen niveles peligrosos de este metal tóxico. La exposición prolongada al plomo en el suelo puede afectar negativamente la salud de las poblaciones cercanas, causando enfermedades neurológicas, daño renal y trastornos en el desarrollo infantil. Además, el plomo en el suelo limita la productividad agrícola, reduciendo la fertilidad del suelo y afectando el crecimiento de cultivos esenciales para la seguridad alimentaria de la región. Si no se toman medidas adecuadas para mitigar esta problemática, el deterioro del suelo y sus impactos adversos sobre la población seguirán incrementándose, poniendo en riesgo la calidad de vida de las generaciones futuras.

Ante esta problemática, el objetivo de la presente tesis fue evaluar el efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina. Para esto se llevó a cabo un estudio experimental en el que se evaluó la reducción del contenido de plomo en diferentes muestras de suelo antes y después de la aplicación del hongo. Además, se analizaron los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo, como la textura, el pH y la capacidad de intercambio catiónico, con el fin de determinar la efectividad de *A. bisporus* en la mejora de la calidad del suelo contaminado. Este estudio se basó en la metodología de micorremediación, la cual ha sido utilizada en otros países con resultados positivos en la remoción de metales pesados de los suelos. La micorremediación es una técnica innovadora y sostenible que emplea organismos fúngicos para la eliminación o estabilización de contaminantes, presentando ventajas sobre otros métodos tradicionales debido a su bajo costo, menor impacto ambiental y alta eficiencia en la biorremediación de suelos.

La conclusión de este estudio fue que la aplicación del *Agaricus bisporus* demostró ser una estrategia efectiva para la micorremediación de suelos contaminados con plomo, logrando una reducción significativa de hasta un 71.5% en su concentración. Además de su capacidad descontaminante, el hongo generó mejoras en la estructura del suelo, aumentando su aireación y reduciendo la compactación, lo que favorece el crecimiento vegetal y la biodiversidad microbiana. También se observaron cambios en las propiedades químicas del suelo, como un incremento en el pH y la capacidad de intercambio catiónico, factores clave para la estabilidad del ecosistema edáfico. Estos resultados resaltan el potencial del *Agaricus bisporus* como una alternativa sostenible y de bajo costo para la rehabilitación de suelos degradados, contribuyendo a la restauración ecológica y la mitigación de la contaminación ambiental.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El suelo se encuentra en la base de la cadena alimentaria, pero es la piedra angular de la vida en la Tierra. Es fundamental para la vida terrestre: actúa como filtro de agua, dador de nutrientes y hábitat para miles de millones de organismos que conforman un ecosistema diverso. Cuando está sano, suministra a los humanos antibióticos que combaten enfermedades, proporciona nutrientes que alimentan nuestros cultivos y su ciclo autosostenible puede regenerarse durante décadas. Un suelo sano ayuda a mitigar el cambio climático al actuar como sumidero de carbono, lo que significa que almacena grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEI) que de otro modo se liberarían. De hecho, el suelo es el segundo mayor sumidero de carbono después del océano: captura más CO₂ que los bosques y retiene tres veces más carbono que la atmósfera terrestre (ClientEarth, 2024).

La contaminación del suelo ha sido identificada como una de las principales amenazas que afectan los suelos globales y los servicios ecosistémicos que brindan. La contaminación del suelo supone un grave riesgo para la salud humana por contacto directo (exposición cutánea, inhalación de partículas de suelo contaminado, ingestión intencional de suelo contaminado) o indirectamente, por el consumo de plantas o animales que han acumulado cantidades significativas de contaminantes del suelo (UNDRR, 2023).

El suelo contaminado con plomo sigue siendo una fuente peligrosa de exposición al plomo para los niños pequeños en distintos puntos del globo. Los depósitos de gasolina con plomo, pintura exterior a base de plomo y fuentes industriales han contribuido al aumento de los niveles de plomo en el suelo. Esto es especialmente común en zonas urbanas y viviendas construidas antes de 1978 (CDC, 2024).

El plomo (Pb) es un metal altamente venenoso que se encuentra de manera natural, que no puede ser eliminado o degradado por ser un elemento

básico. La elaboración y uso del plomo en los productos e industrias de consumo han expuesto a la población a este metal. Las moléculas de plomo logran ser suspendidas por la actividad humana y por el viento, en las personas la principal ruta de exhibición es la ingestión de polvo y tierra contaminado por plomo. El Perú es un país eminentemente minero, se encuentra en el cuarto lugar de los países con mayor producción de plomo en el mundo, por lo que está arriesgado a la polución ambiental procedente por la explotación minera que se da de manera formal e informal en distintos departamentos (Astete et al., 2019).

Las actividades mineras generan grandes daños ambientales y ecológicos dentro de la ciudad de Huánuco, provocando derrames de los relaves mineros contaminado con distintos metales pesados a causa del descuido de estas empresas, afectando zonas aledañas, cubriendo de contaminantes grandes extensiones de terrenos agrícolas afectando y atentando contra la salud pública involucrando a toda la flora y fauna silvestre generando muertes y pérdidas dentro del ecosistema, haciendo que el consumo de estos sean perjudiciales para los humanos, generando grandes problemas para la salud (Redacción EC, 2022).

Uno de los problemas potenciales y la principal razón para realizar este estudio es que, en el distrito de Jacas Chico, provincia de Yarowilca, departamento de Huánuco, se encuentra la minera metálica Huancamina que se dedicaba a la extracción de metales como el Plomo, Zinc y Plata. Esta mina dejó abandonada una relavera, que contamina de plomo los suelos aledaños generando rápidamente la degradación de nuestro suelo, modificando el pH, la conductividad eléctrica y otros parámetros físicos y químicos, haciendo que el suelo sea inutilizable, por lo que es importante considerar una medida de mitigación de este contaminante para reducir los daños ambientales que son generados dentro del ecosistema.

Por lo tanto, con esta investigación se pretendió centrar el estudio de la micorremediación como una solución a la contaminación de suelos por plomo, que presentan una gran significancia ambiental, por ello se utilizó la seta *Agaricus bisporus* como una medida amigable y ecológica para el medio

ambiente con la finalidad de poder mejorar la calidad del suelo contaminado por plomo.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es el efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Cuál es el porcentaje de plomo en el suelo antes y después de la micorremediación con la seta *Agaricus bisporus*?

¿Cuáles son las propiedades físicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta *Agaricus bisporus*?

¿Cuáles son las propiedades químicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta *Agaricus bisporus*?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Describir el porcentaje de plomo del suelo antes y después de la micorremediación con la seta *Agaricus bisporus*.

Describir las propiedades físicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta *Agaricus bisporus*.

Describir las propiedades químicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta *Agaricus bisporus*.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio tuvo como finalidad poder brindar una alternativa de solución amigable para el medio ambiente, respecto a la contaminación de los suelos que fueron degradados por plomo a causa de la explotación de metales

como el zinc, plata y zinc en la minera Huancamina, considerando también los descuidos e irresponsabilidad de las grandes y pequeñas empresas que suelen verter químicos tóxicos en los suelos sin tener conciencia del gran daño que estos generan a los ecosistemas y a su vez atentan contra la salud pública en general.

Uno de los métodos para poder combatir con este problema de deterioro de suelos a causa del plomo es la micorremediación con setas y hongos, ya que, estos tienen la capacidad de adsorción de metales pesados favoreciendo a la microbiología autóctona del suelo. La biotecnología de la micorremediación de suelos con setas y hongos pueden elaborarse de manera in situ o ex situ y a la vez mencionando que son económicos, logrando generar buenos resultados para esta problemática.

Esta investigación tuvo como meta poder conseguir una mejora significativa sobre la calidad del suelo que fue contaminado con plomo, queriéndose mitigar y disminuir a niveles bajos la concentración de plomo en los suelos dañados por este metal pesado.

1.4.1. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

El efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre suelos contaminados por plomo representa una solución ecológica, económica y sostenible para mitigar la contaminación ambiental, mejorar la calidad del suelo y promover el aprovechamiento de recursos locales, con beneficios ambientales, sociales y económicos.

1.4.2. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

El estudio del efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre suelos contaminados por plomo se fundamenta teóricamente en la capacidad del hongo para bioacumular metales pesados mediante sus sistemas enzimáticos y estructuras fúngicas, así como en los principios de la micorremediación como una estrategia biotecnológica basada en interacciones biológicas que reducen la toxicidad y biodisponibilidad de contaminantes en el suelo.

1.4.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL

El estudio del efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre suelos contaminados por plomo se justifica socialmente por su potencial para mitigar la contaminación en comunidades afectadas, mejorar la salud pública al reducir la exposición a metales pesados, generar oportunidades de capacitación y empleo en prácticas sostenibles, y contribuir al bienestar social mediante la rehabilitación de entornos degradados.

1.4.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

El estudio del efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre suelos contaminados por plomo se justifica ambientalmente por su capacidad para reducir la concentración de metales pesados, restaurar la calidad del suelo, promover la recuperación de ecosistemas degradados y ofrecer una alternativa sostenible y ecológica a los métodos tradicionales de remediación ambiental.

1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Una de las principales limitantes encontradas durante el desarrollo del proyecto fue la dificultad para conseguir la semilla o micelio de *Agaricus bisporus*, a pesar de que esta seta es ampliamente conocida y utilizada en el consumo humano por su valor nutricional y comercial. Contrario a lo que podría pensarse, su disponibilidad para fines de investigación o siembra no es tan accesible como otras especies más comunes en estudios de micorremediación.

Otra limitación fue que el *Agaricus bisporus* necesita condiciones ambientales controladas como temperatura entre 18 a 22 °C, alta humedad y un sustrato adecuado, lo cual dificulta su cultivo en entornos sin infraestructura especializada. Cualquier alteración puede afectar su desarrollo o inhibir su crecimiento, representando una limitación técnica relevante.

Para la última limitante se tomó en cuenta que hay poca literatura científica sobre el uso de *Agaricus bisporus* para remediar suelos contaminados con plomo, lo que limita el respaldo teórico del proyecto y dificulta la comparación o validación de resultados experimentales.

1.6. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación es viable porque presenta costos relativamente bajos, lo que lo hace accesible y económico para poder solucionar el problema de la contaminación de suelos por plomo. Para esto se utilizó un adecuado método tecnológico llamado micorremediación el cual hace uso de setas y hongos que pueden brindar una solución para la problemática de suelos contaminados por plomo, a su vez ayudando a mejorar la calidad del suelo incrementando la retención de humedad, descomposición de la materia orgánica y aireación, haciendo que la tierra recupere sus nutrientes.

También, la micorremediación de suelos es una tecnología verde ya que es amigable con el ambiente en general, beneficiando a distintos ecosistemas; tanto terrestres como marinos, haciendo que la flora y fauna de estos ambientes aumenten en grandes aspectos.

La micorremediación también presenta una viabilidad social porque al momento de realizarlo no se llega a perjudicar a ninguna persona que se encuentre cerca al lugar de estudio, tomando en cuenta que la investigación llegará a beneficiar, ya sea de manera indirecta o directa al entorno que lo rodea.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

He et al., (2022) en su artículo científico llamado “Bioacumulación y cambios fisiológicos en el cuerpo fructífero de *Agaricus bisporus* (grande) cantan en respuesta al cadmio”, tuvieron como objetivo fue conseguir un hongo con fuerte tolerancia a los metales pesados y que sea fácil de cultivar, ya que la remediación de metales pesados en suelos contaminados se ha vuelto un tema urgente en China, la metodología empleada para el experimento se llevó a cabo mediante cultivo en un marco cuadrado de plástico hueco de 45 x 50 x 32 cm. El suelo de revestimiento fue suelo de turba, con un contenido de materia orgánica de $455,65 \pm 3,63 \text{ g kg}^{-1}$, un contenido de fósforo total de $1,32 \pm 0,14 \text{ g kg}^{-1}$, un contenido de nitrógeno total de $15,69 \pm 0,18 \text{ g kg}^{-1}$, un contenido de potasio total de $17,56 \pm 0,66 \text{ g kg}^{-1}$, el contenido de potasio disponible de $924 \pm 0,03 \text{ mg kg}^{-1}$, el contenido de fósforo disponible de $110,83 \pm 16,03 \text{ mg kg}^{-1}$ y el contenido de nitrógeno disponible de $255,27 \pm 7,92 \text{ mg kg}^{-1}$. Luego de esto, se inoculó la cepa de *A. bisporus* (utilizando semillas como material de cultivo del hongo secundario, que se prepara en la fábrica) sobre el compost (de unos 15 cm de altura). El compost estaba hecho principalmente de paja de trigo, estiércol de pollo y harina de colza, al que se le añadía urea, yeso y tierra de turba y se fermentaba en dos etapas. La temperatura y el riego se controlarán de acuerdo con la situación real para mantener la temperatura del compost en aproximadamente 25 °C y la humedad entre 90 y 95 %. Después de 15 días, se cubrió uniformemente el suelo de turba tratado con diferentes contenidos de Cd con un espesor de aproximadamente 3 cm y manteniendo la temperatura del compost en aproximadamente 25 °C y la humedad en un 90-95%. Cuando el micelio crece hasta la superficie del suelo, comienza a reducir la temperatura del compost de 25 °C a 20-21 °C y la humedad relativa del aire de 90-95% a 85-90% para promover el crecimiento del cuerpo fructífero, los resultados indicaron que los

contenidos de Cd fueron de 0,37 a 18,38 mg kg⁻¹ DW en el sombrero y de 0,40 a 13,50 mg kg⁻¹ DW en el estipe, lo que indica que la bioacumulación de Cd de *A. bisporus* mostró una tendencia significativa dependiente del contenido de Cd y aumentó gradualmente. La biomasa del sombrero de *A. bisporus* es mayor que la del estípite, lo que resulto beneficioso para la extracción de Cd del suelo, como conclusión tuvieron que el *A. bisporus* puede tolerar altos contenidos de Cd hasta 414,28 ± 0,12 mg kg⁻¹ y puede acumular Cd. El metabolismo de las proteínas y los azúcares, varios antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos del *A. bisporus* desempeñaron un papel importante en la desintoxicación y sobrevivieron bajo estrés por Cd.

Calderón, (2022) en su publicación “Análisis de las aplicaciones de *Pleurotus ostreatus* como alternativa en la biorremediación de residuos mineros”, Universidad Autónoma del Estado de Morelos – México, Cuernavaca, tuvo como objetivo examinar el uso del *Pleurotus ostreatus* como una opción dentro de la biorremediación de metales pesados procedentes de la acción minera, describiendo los métodos alcanzados para la eliminación de metales pesados por medio de la micorremediación con el *Pleurotus ostreatus*, para su metodología se basó en que el *Pleurotus ostreatus*, aparte de ser comercializado por su uso alimenticio, también es manipulado para temas sobre micorremediación, esto se debe a que sus enzimas lignolíticas catalizan la oxidación de: diaminas, polifenoles, aminas aromáticas y difenoles, para esto aprovechó que el *P. ostreatus* puede acumular contaminantes en las superficies de las células fúngicas en base de la biosorción y también pueden acumularlo intracelularmente adentro de las vacuolas y distintos organelos, como resultado obtuvo que; el *Pleurotus ostreatus* es una buena alternativa para fines de biorremediación ya que es un método útil para obtener micelio para la biosorción de iones metálicos, ya que es un hongo comestible cultivable, de alto rendimiento y seguro, su conclusión fue que el *P.ostreatus* puede considerarse como una ayuda biotecnológica eficiente, al menos para la eliminación de Pb y Cd. En general, los porcentajes

efectivos son muy elevados, oscilando entre el 75% y el 99% para el plomo y entre el 21% y el 90% para el cadmio.

Hidalgo et al., (2023) en su artículo científico “Mikorremediación con sustratos de crecimiento de *Agaricus bisporus* y *Pleurotus ostreatus* versus fitorremediación con *Festuca rubra* y *Brassica* sp. para la recuperación de un suelo contaminado con Pb y γ -HCH”, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de los sustratos de crecimiento de *Agaricus bisporus* y *Pleurotus ostreatus* (sustratos de hongos inoculados versus sustratos de hongos gastados) para la micorremediación de suelos contaminados con plomo y lindano (γ -HCH), en la metodología se tomó tierra de dos zonas diferentes de un campo de tiro al aire libre situado en Oiartzun (España). En cada área, se recolectaron 100 kg de suelo a una profundidad de 0 a 30 cm, y luego se homogeneizaron y tamizaron completamente (<6 mm). Una de las áreas del campo de tiro tenía una concentración total promedio de Pb de 347 ± 29 mg kg⁻¹ DW suelo (en adelante denominado suelo de 350 Pb), mientras que la otra mostró un valor promedio de 1DW en suelo (en valor de 1930 ± 91 mg Pb kg⁻¹ Pb adelante, 1930-Pb). Posterior a esto el suelo recolectado se contaminó artificialmente con γ -hexa-clorociclohexano (γ -HCH) y se homogeneizó utilizando una mezcladora de cemento. Brevemente, se aplicó γ -HCH en una solución de n-hexano/acetona (50/50 v/v). Para alcanzar lentamente una concentración final de 100 mg de Suelo DW. Subse-Y-HCH kg, el suelo se mantuvo a temperatura ambiente durante 4 semanas para permitir la estabilización de los contaminantes, los resultados obtenidos en los tratamientos de micorremediación mostraron la reducción más significativa en las concentraciones de γ -HCH en el suelo, en comparación con los tratamientos de control (sin tratar) y de fitorremediación. El tratamiento más eficaz para la eliminación de γ -HCH fue la aplicación de *P. ostreatus*, que redujo la concentración de γ -HCH en un 88,9 % en suelo de 1930 Pb y un 54,4 % en suelo de 350 Pb, respectivamente, en comparación con sus controles correspondientes. Los tratamientos de fitorremediación no redujeron significativamente las concentraciones de γ -HCH, en comparación con el control no tratado. La aplicación de los

tratamientos estudiados condujo a un aumento general de los valores de los parámetros fisicoquímicos del suelo. Más concretamente, los tratamientos de micorremediación con *A. bisporus* IMS y SMS mostraron los valores más altos de N total, P Olsen, K+ extraíble y pH. Se observaron cambios menos relevantes en los parámetros fisicoquímicos del suelo como resultado de la aplicación de *P. ostreatus* IMS y SMS. A su vez, los tratamientos de fitorremediación aumentaron los valores de CIC, C total y MOS, la conclusión de este experimento es que la estrategia de remediación seleccionada debe ser rentable y respetuosa con la integridad de la matriz física y biológica del suelo, mencionando que en el experimento, se demostró el gran potencial de la micorremediación con sustratos de crecimiento de *P. ostreatus* (particularmente, el IMS) para la remediación biológica de un suelo contaminado con γ -HCH y Pb, tanto en términos de reducción de los niveles de contaminantes como de mejora de la calidad del agua y salud del suelo. La combinación de sustratos de crecimiento de *P. ostreatus* con plantas aptas para la fitoextracción de metales (acumuladores, hiperacumuladores) podría facilitar la eliminación simultánea de metales del suelo y la degradación de contaminantes orgánicos, ayudando así a superar las limitaciones de cada estrategia individual.

Fereshteh & Mehdi, (2022) en su artículo científico “Respuesta de crecimiento y micorremediación de metales pesados por el hongo *Pleurotus* sp.”, tuvo como objetivo fue evaluar la tasa de tolerancia del hongo *Pleurotus* sp. cultivado en medios de cultivo puros sólidos y líquidos expuestos a diferentes niveles de metales pesados, como Cu, Ni, Co, en la metodología se recolectó un tipo específico de hongo que vive en árboles leñosos en Irán, y se cultivó en medio sólido modificado con diferentes concentraciones (0, 15, 30, 45, 60 ppm) de cada sal de sulfato de metal pesado. cobre, níquel y cobalto (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+}), las placas de Petri se colocaron a una temperatura de 25 °C hasta que el diámetro de la colonia en la placa de Petri de control (concentración cero de cada metal) alcanzó los 7 cm. El diámetro más ancho se midió como el crecimiento radial del micelio. Luego, se midió el diámetro de cada colonia

en la parte más ancha con una regla con una precisión de 0,1 cm. Posteriormente un número igual de discos miceliales de las paredes de micelios cultivados en medio sólido en condiciones estériles se transfirieron a matraces Erlenmeyer que contenían medio líquido que contenía diferentes metales pesados (Co 2+, Cu 2+, Ni 2+) con diferentes concentraciones (0, 15, 30, 45, 60 ppm). Los matraces se colocaron en una incubadora a 25 °C durante 3 semanas para que el micelio creciera en el ambiente líquido y cubriera la superficie del líquido. Después de 21 días, los micelios fueron recolectados, lavados en agua destilada, luego secados en estufa a 105 °C y finalmente pesados con una balanza con precisión de 0.0001. Después de secar el micelio a 105 °C en estufa, se realizó digestión ácida del micelio utilizando 5 ml de HNO₃ concentrado y 1 ml de HF durante 24 h. Luego, la solución de digestión ácida se usó para la medición elemental utilizando el espectrofotómetro de absorción atómica, para la actividad de SOD se utilizó el método de Giannopolitis y Ries que se basó en la fotoabsorción de nitroazul de tetrazolio, la solución de extracción (tampón fosfato 50 mM, pH = 7,8, NBT 0,075 μM, Na-EDTA 0,1 mM, armetionina 13 mM y 50 μL) se mezcló con 100 μL del sobrenadante del hongo, luego riboflavina 75 μM fue la última componente añadido a la mezcla de reacción. Luego, los tubos se colocaron bajo dos lámparas fluorescentes de 15 W que iniciaron la reacción. Después de 10 minutos, retirando los tubos de reacción de la fuente de luz se terminó la reacción, los resultados fueron que las respuestas de *Pleurotus* sp. en cobalto, cobre y níquel expresados por crecimiento de colonias en placas de agar no creció en un medio que contenía níquel ni siquiera en concentraciones tan bajas como 15 mg/L, los resultados también mostraron que el diámetro de las colonias de hongos disminuyó significativamente con el aumento de la concentración de metales en el medio de cultivo sólido en comparación con el control, en la conclusión de este artículo se demostró que la tolerancia a los metales varió significativamente, lo que indica que *Pleurotus* sp. era más tolerante al Co que a otros metales, por lo que el hongo crecía más en presencia de bajas concentraciones de Co y Cu. Sin embargo, incluso en concentraciones tan bajas como 15 mg/L, el Ni inhibió en gran medida el crecimiento de la

biomasa y el diámetro de las colonias. Los metales pesados indujeron actividad catalasa (CAT) en superóxido dismutasas (SOD) hasta 45 mg/L, pero un aumento en la concentración de metal por encima de 45 mg/L resultó en una disminución significativa en las actividades de SOD. Los metales en el micelio también aumentaron a medida que aumentaron las concentraciones de estos metales pesados.

(Vaca et al., 2023) en su artículo científico “Biorrestauración de un suelo contaminado con diésel mediante composteo con residuos de champiñón común (*Agaricus bisporus*) y cáscaras de plátano (*Musa sp.*)”, tuvo como objetivo evaluar la eficacia de una estrategia de biorremediación basada en el composteo de residuos orgánicos (cáscaras de plátano) y materiales residuales del cultivo de *Agaricus bisporus* para reducir la contaminación por hidrocarburos en suelos contaminados con diésel, determinando su impacto en la calidad del suelo y la reducción de hidrocarburos presentes, su metodología consistió en seleccionar suelos contaminados con diésel, mezclar residuos del cultivo de *Agaricus bisporus* y cáscaras de plátano en proporciones específicas para formar compost, aplicarlo a los suelos contaminados en diferentes dosis, y monitorear la degradación del diésel mediante análisis periódicos de la concentración de hidrocarburos, así como la evaluación de parámetros como la actividad microbiana, nutrientes y características físicas del suelo, los resultados mostraron que, tras aplicar el compost con residuos de *Agaricus bisporus* y cáscaras de plátano durante 2 meses, se logró una reducción significativa de la concentración de diésel en los suelos contaminados, mejoró la actividad microbiana y aumentaron los niveles de nutrientes esenciales como el nitrógeno y el fósforo, comparado con el suelo no tratado, las conclusiones señalaron que el compost preparado con residuos de *Agaricus bisporus* y cáscaras de plátano demostró ser una alternativa eficaz para la biorremediación de suelos contaminados con diésel, ya que logró una reducción significativa de la concentración de hidrocarburos en el suelo. también, se observó un aumento en la actividad microbiana, lo que sugiere que la biodegradación de los contaminantes fue facilitada por la acción de los microorganismos presentes en el

compost, también se mejoraron parámetros clave de la calidad del suelo, como el contenido de nutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo) y las características físicas del mismo, como su capacidad de retención de agua y porosidad, lo que favorece la regeneración del ecosistema afectado.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Vásquez, (2019) en su tesis “Capacidad Micorremediadora del hongo *Pleurotus ostreatus* en suelos contaminados con Cadmio”, tuvo como objetivo determinar la capacidad micorremediadora del hongo *Pleurotus ostreatus*, en suelos contaminados con cadmio, para la metodología se preparó a nivel de laboratorio un suelo agrícola contaminado con Cd, Para esto se realizó las siguientes etapas: 1) Preparación de la solución contaminante, 2) Preparación del suelo contaminado, 3) Preparación del inóculo *Pleurotus ostreatus*, 4) Preparación de los tratamientos para la descontaminación del suelo, 5) Análisis de Parámetros del proceso de micorremediación, los resultados se obtuvo que el cultivo del hongo *P.ostreatus* en agar papa dextrosa tuvo una duración de 9 días, su crecimiento micelial en la placa petri no fue constante, debido a que el desarrollo del hongo, en las mediciones que se realizaron, presento valores que fueron cambiando con el pasar de los días, también, se observó que el crecimiento micelial del hongo *P. ostreatus*, se obtuvo en el día 6, a su vez los días 4 y 9 presentaron los valores de crecimiento más bajos en su desarrollo, en las conclusiones se logró determinar que el hongo *P.ostreatus* tiene la capacidad de reducir el ph del suelo a 5.30 y mantener la humedad gravimétrica del suelo en 11%, con la finalidad de lograr un ambiente adecuado para su desarrollo y una mejor eficiencia en la disminución de cadmio en el suelo (34%), también se logró determinar que los tratamientos aplicando el hongo *P.ostreatus*, lograron un porcentaje alto de disminución de 34%, para los suelos contaminados con cadmio a un buen pH (5.30), humedad gravimétrica (11%) y humedad relativa (60%).

Rodriguez & Melendez, (2019) en su tesis titulada “Eficiencia de *Lentinus edodes*, *Pleurotus ostreatus* y *Agaricus bisporus* para la

remediación de suelos contaminados por plomo y cadmio proveniente de La Oroya antigua, Lima - Perú, 2019”, su objetivo está basado en evaluar la eficiencia de *Lentinus edodes*, *Pleurotus ostreatus* y *Agaricus bisporus* en la remediación de suelos contaminados por plomo y cadmio proveniente de La Oroya antigua, Lima - Perú, durante el periodo 2019, en su metodología tiene dos muestras de suelo provenientes de la ciudad de la Oroya antigua, siendo estas a 40cm y 1m, se realizaron tres repeticiones por cada hongo, cada 5 días, obteniendo un total de 162 unidades experimentales, en base al EPA 3050, se llevó a cabo el análisis de las muestras, para que posteriormente se lleve al espectrofotómetro de absorción atómica, se obtuvo como resultado que con relación a la eficiencia de remediación en plomo, las especies fúngicas *Pleurotus ostreatus* y *Agaricus bisporus* resultan ser eficientes y para cadmio los tres hongos son eficientes; también se determinó que la dosis adecuada para la eficiencia son las tres para ambos metales; respecto al tiempo óptimo, se tiene que es a los 5 días, en las conclusiones se determinó que la seta *Pleurotus ostreatus* y la seta *Agaricus bisporus* resultan ser más eficientes para la remediación de plomo, mientras que para remediar suelos contaminados con cadmio, los 3 hongos resultan ser eficientes.

Núñez et al., (2023) en su artículo “Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales”, se tuvo como objetivo estabilizar los residuos orgánicos para que estos puedan ser utilizados como biofertilizantes, en la metodología primero se produce biomasa fúngica, basándose en los siguientes pasos: 1) Dilución de un gramo de hongo (sustrato sólido) en 10 ml de agua destilada. 2) Preparación del medio de cultivo y siembra del hongo. 3) Crecimiento de hongo 5 a 8 días. 4) Solución madre a partir de muestra de hongo esporulado. 5) Inoculación de hongo en sustrato líquido. 6) Inoculación del hongo en medio sólido. 7) Cultivo en incubadora a temperatura de 24-28 °C. 8) Proceso de secado para disminuir la humedad 30% - 35%. 9) Proceso de embolsado a una temperatura de 16-20 °C, los resultados dieron que el cadmio es el más tóxico para los organismos vivos, incluso

si esta se encuentra en concentraciones muy bajas ($<5 \mu\text{M}$); el cadmio manifiesta muy lentamente a los procesos de biorremediación por ello permanece en el suelo durante períodos extendidos, sin embargo, muchos microorganismos pueden estabilizar el Cd y otros metales pesados por adsorción en su pared celular, lo que se atribuye a la prevalencia de grupos funcionales aniónicos como carboxilo, amina, hidroxilo, fosforilo y sulfhidrilo en sus paredes celulares, se concluyó que una técnica importante para conseguir la reducción de los metales pesados y eliminar oligoelementos potencialmente tóxicos en el proceso de compostaje sería la bioadsorción fúngica, siendo la biomasa fúngica capaz de secuestrar metales pesados bio asimilables y prevenir la translocación a los vegetales, disminuyendo la disponibilidad de los metales en el suelo.

(Gamarra, 2022) en su tesis titulado "Análisis de eficiencia de la técnica de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante lodos residuales", el objetivo del estudio fue evaluar la eficiencia de la técnica de biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos, empleando lodos residuales provenientes de procesos agrícolas y fúngicos, destacando el uso de residuos de *Agaricus bisporus* como fuente biológica para incrementar la actividad microbiana y degradar los compuestos contaminantes, La metodología empleada incluyó la preparación de muestras de suelo contaminado con hidrocarburos, a las cuales se les aplicaron distintas dosis de lodos residuales derivados del cultivo de *Agaricus bisporus*, posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de incubación controlada durante un período de 30 días, manteniendo condiciones específicas de humedad y temperatura para favorecer la actividad biológica, durante este tiempo, se realizaron evaluaciones periódicas que incluyeron la medición de la reducción de hidrocarburos totales presentes en el suelo, el análisis de la actividad enzimática (particularmente lacasas y peroxidases), y la cuantificación de la población microbiana (hongos y bacterias). también, se analizaron cambios en las propiedades físico-químicas del suelo para determinar el impacto del tratamiento en su estructura y composición, los resultados del

estudio demostraron que los lodos residuales de *Agaricus bisporus* fueron altamente efectivos en la biorremediación de suelos contaminados, logrando una remoción de hasta el 70% de los hidrocarburos totales presentes en el suelo tratado, además, se observó un incremento significativo en la actividad microbiana, con una proliferación notable de bacterias y hongos beneficiosos, así como una mayor actividad enzimática, especialmente de lacasas y peroxidasas, que fueron fundamentales en la degradación de los contaminantes, asimismo, el tratamiento con estos lodos mejoró de manera considerable la estructura y composición del suelo, aumentando su capacidad para retener nutrientes esenciales y contribuyendo a una recuperación ambiental integral, destacando su potencial como una solución sostenible y económica para la mitigación de la contaminación por hidrocarburos, como conclusión se obtuvo que el uso de lodos residuales y *Agaricus bisporus* demostró ser una estrategia efectiva para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, los residuos fúngicos no solo promovieron la degradación de los contaminantes, sino que también mejoraron las propiedades físico-químicas del suelo.

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES

No se han encontrado antecedentes locales pertinentes al estudio, sin embargo, se agregó una mayor cantidad de antecedentes internacionales y nacionales.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. MICORREMEDIACIÓN

La micorremediación del suelo es un proceso de biorremediación durante el cual un suelo contaminado es tratado y curado mediante la acción del metabolismo fúngico. Su implementación consiste en el tratamiento in situ del suelo excavado mediante bioaumentación fúngica dentro de una biopila. Los hongos, son un grupo diverso de organismos y están omnipresentes en el medio ambiente. Pueden existir y sobrevivir en casi todos los hábitats y desempeñar funciones vitales en todos los ecosistemas. Hoy en día, su aporte se extiende a diversos fines industriales (Novobiom, 2023).

La micorremediación es una forma de biorremediación: utilizar enzimas producidas por hongos, en lugar de bacterias, para descomponer los contaminantes y restablecer el equilibrio del ecosistema. Básicamente, los hongos no producirán enzimas que no necesitan; como tal, las vías metabólicas pueden permanecer inactivas en los genomas de los hongos durante generaciones. Un hongo tendrá que desenterrar vías olvidadas, a menudo con un poco de estímulo por parte de los micólogos, para descomponer enzimáticamente los contaminantes. Este método no sólo es eficiente y eficaz, sino que también es de bajo coste. La capacidad de los hongos para persistir durante cinco grandes eventos de extinción anteriores en este planeta simplemente demuestra su poder de remediación y sería negligente ignorarlos mientras nos enfrentamos al sexto. Hay mucho potencial sin explotar en el Reino Fungi, y eso nos presenta esperanza a la hora de afrontar los numerosos desafíos del siglo XXI (Fungi Foundation, 2023).

Los sistemas de micorremediación dependen básicamente de microorganismos (hongos) nativos de los sitios contaminados. Los hongos pertenecientes a los basidiomicetos (hongos de pudrición blanca) también se conocen como herramientas de micorremediación debido a su uso en la remediación de diferentes tipos de contaminantes. La micorremediación se basa en enzimas eficientes, producidas por hongos, para la degradación de varios tipos de sustratos y contaminantes. Sin embargo, a veces absorben el contaminante en su micelio (biosorción) y no pueden consumirse debido a los tóxicos absorbidos. Ejemplos de hongos utilizados como micorremediadores son *Pleurotus ostreatus*, *Rhizopus arrhizus*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes hirsute*, *T. versicolor*, *Lentinus edodes*, *Cladosporium resinae*, *Aspergillus niger*, *A. flavus*, *A. terreus* y *Trichoderma longibrachiatum*. La micorremediación in situ trata el suelo contaminado en el lugar donde se encontró, mientras que los procesos ex situ requieren la excavación del suelo contaminado antes de que pueda ser tratado. Sin embargo, a pesar de ser la biomasa viva dominante en el suelo, los hongos aún no se han explotado significativamente para la micorremediación de entornos tan

contaminados. Es necesario realizar investigaciones más amplias sobre el uso de hongos en la micorremediación (Dutta & Hyder, 2017).

Los contaminantes ambientales globales se están volviendo intensos debido al aumento de la población humana, la urbanización y la industrialización. La salud humana y el ecosistema se ven afectados por la contaminación del suelo y del agua. Por lo tanto, crear estrategias es esencial para abordar este problema persistente. En el proceso, se pueden reducir significativamente los riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con estos contaminantes. Anteriormente, se habían empleado técnicas de remediación tradicionales para combatir estos contaminantes ambientales, pero resultaron ineficaces. La micorremediación, que utiliza hongos o sus compuestos para remediar contaminantes ambientales, ha demostrado ser un método de remediación ambiental eficaz, rentable y respetuoso con el medio ambiente que incluye contaminantes orgánicos, inorgánicos y emergentes (antibióticos, productos farmacéuticos). Además, se destacó la eliminación de metales, contaminantes orgánicos persistentes y otros contaminantes emergentes mediante micorremediación (Okiemute et al., 2023).

La contaminación por metales también se puede remediar micológicamente. A través del proceso de biosorción, *Agaricus bisporus*, *Fomes fasciatus*, *Pleurotus platypus* y *Calocybe indica* pueden ayudar a limpiar elementos como cobre, zinc, hierro, cadmio y desechos de metales pesados. Para generar absorción de contaminantes metálicos se desarrollan biosorbentes utilizando micelio de hongos o compost de hongos (biomasa muerta) (Okiemute et al., 2023).

Los hongos son los organismos más potenciales e ideales para eliminar metales pesados y degradar diversos contaminantes, ya que numerosos estudios los reconocen como hiperacumuladores de metales pesados. Utilizan la biosorción, la bioacumulación, la biotransformación y la biovolatilización como principales mecanismos para remediar los metales pesados y metaloides. El empleo de procesos integrados para la

eliminación de metales pesados del ambiente contaminado supera los obstáculos que enfrentan las técnicas individuales (físicas, químicas o biológicas). Los procesos integrados tienen varias ventajas, como eficiencia, rentabilidad, corta duración, versatilidad, respeto al medio ambiente, adaptabilidad in situ y opciones de implementación a gran escala. La fitorremediación fúngica es una tecnología prometedora y eficaz. En este capítulo se discute el problema de la contaminación por metales pesados, la importancia de los hongos como biosorbentes potenciales de metales, las interacciones con los metales, el potencial de varios hongos en la biosorción, su tolerancia y mecanismos desintoxicantes, y las perspectivas futuras de la micorremediación del suelo (Refaey et al., 2021).

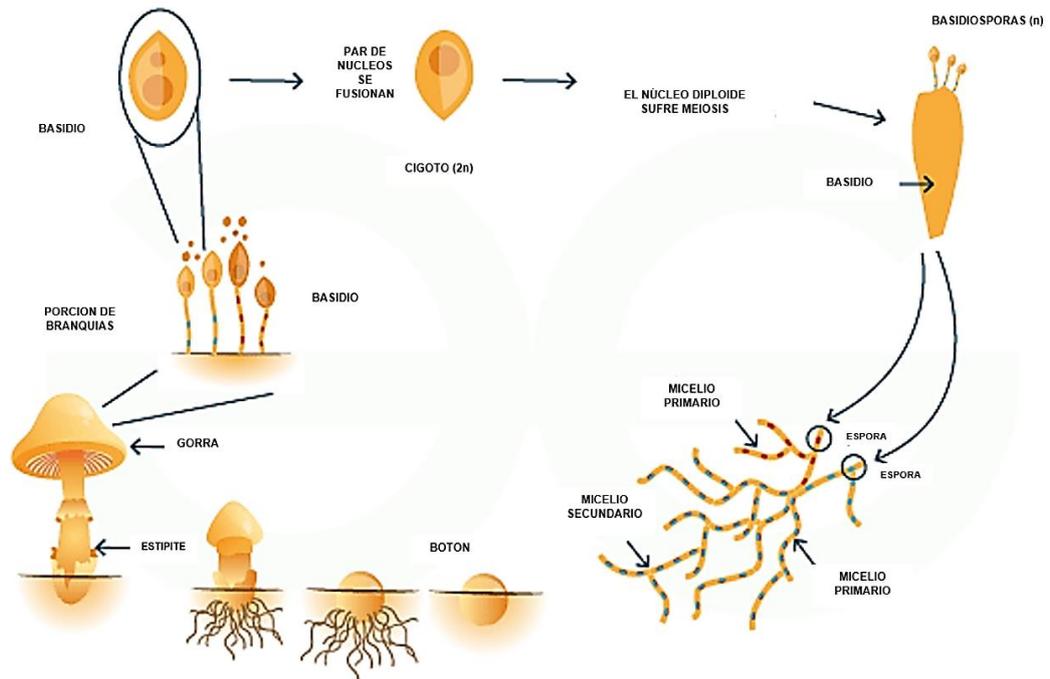
Ciclo de vida del *Agaricus bisporus*

Agaricus bisporus, conocido comúnmente como champiñón, sigue un ciclo de vida similar al de la mayoría de los hongos. Este ciclo es de naturaleza cíclica, tal como se observa en los diagramas típicos del ciclo de vida fúngico. Los individuos adultos producen esporas microscópicas, que son estructuras reproductivas diseñadas para dispersarse y germinar en condiciones favorables. Una vez germinadas, las esporas forman un micelio, una red de hifas que se expande y se desarrolla, aprovechando los nutrientes del entorno. A medida que el micelio madura, se forman cuerpos fructíferos, los cuales corresponden a la fase visible del hongo. Estos cuerpos fructíferos alcanzan la madurez, completando el ciclo al producir nuevas esporas que darán inicio a un nuevo ciclo de vida. Este proceso asegura la supervivencia y propagación de la especie en su entorno natural. (Sciencing, 2021).

Sciencing (2021) menciona las etapas del ciclo de vida del *Agaricus bisporus*, desde el primer ciclo hasta el último ciclo de la seta: Inoculación - Germinación de esporas - Expansión micelial - Formación de primordios - Selección de cuerpo frutal - Cuerpo frutal maduro - Liberación de esporas.

Figura 1

Ciclo del Agaricus bisporus



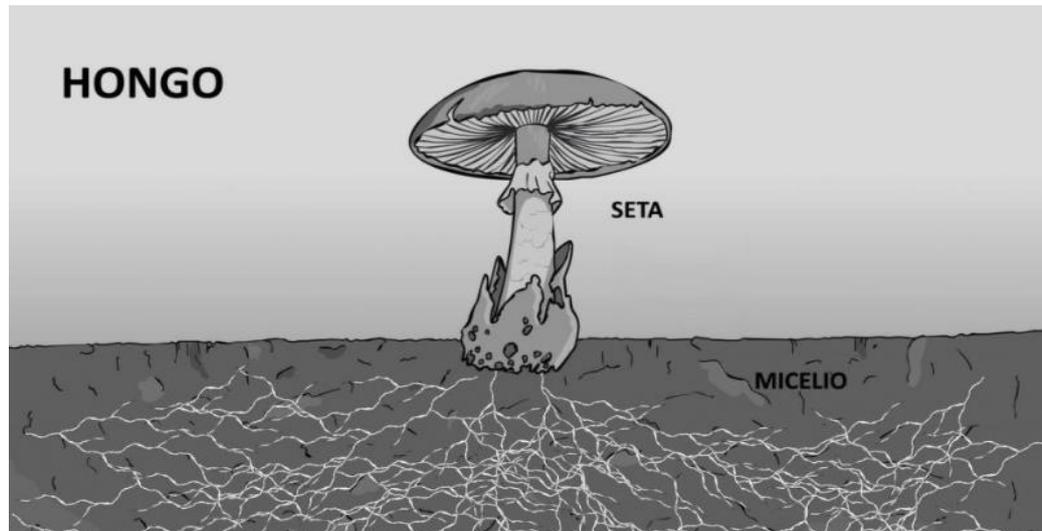
Nota. La figura muestra como es el ciclo de vida de la seta *Agaricus bisporus*. GeeksforGeeks (2024).

Diferencias entre un hongo y una seta

Un hongo es un ser vivo compuesto por dos partes principales, cada una con funciones específicas. La más importante es el micelio, ubicado en el interior de la tierra. Esta estructura, no comestible, está formada por una red de filamentos diminutos llamados hifas. El micelio constituye el cuerpo vegetativo del hongo, aunque a menudo se confunde erróneamente con una raíz. Su función principal es descomponer materia orgánica y facilitar el desarrollo del organismo. La segunda parte es la seta, visible desde el exterior y comestible en ciertos casos. Esta estructura actúa como el aparato reproductor del hongo, encargado de producir esporas para su reproducción. La seta es la única parte del hongo que puede ser utilizada en la gastronomía, mientras que el micelio permanece enterrado y fuera del alcance culinario. (Fungi turismo, 2017).

Figura 2

Diferencia entre un hongo y una seta



Nota. La figura muestra la diferencia de lo que es un hongo y una seta. Fungi Turismo (2017).

Alimentación de los hongos

Los hongos vegetales obtienen su alimento de plantas muertas y en descomposición. En definitiva, son saprófitos. Las plantas son verdes porque contienen clorofila, que les ayuda en la fotosíntesis, el proceso de convertir la luz solar en alimento. Los hongos no son verdes y no contienen clorofila. Por tanto, no pueden realizar la fotosíntesis. Los hongos obtienen su alimento metabolizando materia orgánica muerta o en descomposición, como las plantas muertas del suelo. Pequeños filamentos llamados hifas absorben los nutrientes de la materia muerta. Los hongos están formados por filamentos de hifas y una masa de hifas se denomina micelio. Por eso, a menudo se ven hongos creciendo en tocones de árboles muertos (Wilkin & Brainard, 2021).

Nutrición

Los hongos obtienen su nutrición absorbiendo compuestos orgánicos del medio ambiente. Los hongos son heterótrofos: dependen únicamente del carbono obtenido de otros organismos para su metabolismo y nutrición. Los hongos han evolucionado de una manera que les permite a muchos de ellos utilizar una gran variedad de sustratos orgánicos para su crecimiento, incluidos compuestos simples como

nitrato, amoníaco, acetato o etanol. Su modo de nutrición define el papel de los hongos en su entorno (Nieto et al., 2019).

LibreTexts, (2016) menciona que los hongos obtienen nutrientes de tres formas diferentes:

Descomponen la materia orgánica muerta

Un saprótrofo es un organismo que obtiene sus nutrientes de materia orgánica no viva, generalmente materia vegetal o animal muerta y en descomposición, mediante la absorción de compuestos orgánicos solubles. Los hongos saprotróficos desempeñan papeles muy importantes como recicladores en el flujo de energía de los ecosistemas y los ciclos biogeoquímicos. Los hongos saprofitos, como el shiitake (*Lentinula edodes*) y los hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*), descomponen el tejido vegetal y animal muerto liberando enzimas de las puntas de las hifas. De esta manera reciclan materiales orgánicos de regreso al medio ambiente circundante. Debido a estas capacidades, los hongos son los principales descomponedores en los bosques.

Se alimentan de huéspedes vivos

Como parásitos, los hongos viven dentro o sobre otros organismos y obtienen sus nutrientes de su huésped. Los hongos parásitos utilizan enzimas para descomponer el tejido vivo, lo que puede provocar enfermedades en el huésped. Los hongos que causan enfermedades son parásitos. Recordemos que el parasitismo es un tipo de relación simbiótica entre organismos de diferentes especies en la que uno, el parásito, se beneficia de una estrecha asociación con el otro, el huésped, que resulta perjudicado.

Viven mutualistamente con otros organismos

Los hongos mutualistas viven inofensivamente con otros organismos vivos. Recordemos que el mutualismo es una interacción entre individuos de dos especies diferentes, en la que ambos individuos se benefician.

Reproducción de hongos

Después de un período de crecimiento intensivo, los hongos entran en una fase reproductiva formando y liberando grandes cantidades de esporas. Las esporas suelen ser células individuales producidas por fragmentación del micelio o dentro de estructuras especializadas (esporangios, gametangios, esporóforos, etc.). Las esporas pueden producirse directamente mediante métodos asexuales o indirectamente mediante reproducción sexual. La reproducción sexual en los hongos, como en otros organismos vivos, implica la fusión de dos núcleos que se unen cuando se unen dos células sexuales (gametos). La reproducción asexual, que es más sencilla y directa, puede realizarse mediante varios métodos (Britannica, 2024).

La mayoría de los hongos pueden reproducirse tanto de forma asexual como sexual, esto les permite adaptarse a las condiciones del medio ambiente. Pueden propagarse rápidamente mediante reproducción asexual cuando las condiciones son estables. Pueden aumentar su variación genética a través de la reproducción sexual cuando las condiciones cambian y la variación puede ayudarlos a sobrevivir (Eco360, 2023).

Reproducción asexual

La reproducción asexual de los hongos es un proceso que les permite multiplicarse sin la necesidad de la reproducción sexual. A diferencia de otros organismos, los hongos no producen semillas que necesiten ser fertilizadas para dar lugar a un nuevo individuo. En cambio, utilizan diferentes métodos de reproducción asexual para generar clones de sí mismos. Uno de los métodos más comunes de reproducción asexual en los hongos es la formación de esporas. Las esporas son células especializadas que se desarrollan en estructuras llamadas esporangios. Estas esporas pueden ser liberadas al ambiente y germinar para formar nuevos individuos. Este proceso es similar a la reproducción por esporas que se encuentra en otros organismos, como los helechos. Otro método de reproducción asexual en los hongos es a través de la formación de

fragmentos o brotes. En este proceso, una parte del hongo se separa del organismo original y se desarrolla como un nuevo individuo. Esto puede ocurrir mediante la división de un micelio (la red de filamentos que constituye el cuerpo del hongo) o a través de la formación de estructuras especializadas, como los bulbillos o las yemas. Los hongos también pueden reproducirse asexualmente mediante la producción de estructuras llamadas conidios. Los conidios son pequeñas células que se forman en estructuras especializadas llamadas conidióforos, estas células pueden ser liberadas al ambiente y germinar para formar nuevos individuos (Gulbenkian Garden, 2021).

Casi todos los hongos se reproducen asexualmente produciendo esporas. Una espora de hongo es una célula haploide producida por mitosis a partir de una célula madre haploide. Es genéticamente idéntica a la célula madre. Las esporas de hongos pueden convertirse en nuevos individuos haploides sin ser fertilizados. Las esporas pueden dispersarse mediante el agua en movimiento, el viento u otros organismos. Algunos hongos incluso tienen cañones que disparan las esporas lejos del organismo original. Esto ayuda a garantizar que la descendencia no tenga que competir con los padres por espacio u otros recursos. Los puffballs, liberan una nube de esporas cuando se les golpea o se les pisa. Donde quiera que caigan las esporas, no germinan hasta que las condiciones sean favorables para el crecimiento, luego se desarrollan en nuevas hifas (Wilkin & Brainard, 2021).

En la reproducción asexual, los hongos utilizan diversos métodos como la esporulación, gemación y fisión binaria:

- **Esporulación**

El principal mecanismo de reproducción asexual de los hongos es la producción de esporas mitóticas, las cuales son liberadas al ambiente para formar nuevos individuos. Estas esporas se desprenden del organismo parental y se dispersan mediante diversos medios, como flotando en el viento o siendo transportadas por animales. A diferencia de las semillas de las plantas, las esporas de los hongos son mucho más

pequeñas y ligeras, lo que facilita su dispersión a grandes distancias, un ejemplo impresionante de este proceso ocurre con los hongos gigantes, que liberan billones de esporas de forma explosiva, aumentando así las probabilidades de colonizar nuevos hábitats. Este mecanismo asegura la continuidad de la especie y su capacidad para adaptarse a diferentes entornos. (Huang & Hull, 2017).

- **Gemación**

Se produce en la mayoría de las levaduras y en algunos hongos filamentosos. En este proceso, se desarrolla una yema en la superficie de la célula de levadura o de la hifa, con el citoplasma de la yema se continúa con el de la célula madre. Luego, el núcleo de la célula madre se divide; uno de los núcleos hijos migra hacia la yema y el otro permanece en la célula madre. La célula madre es capaz de producir muchas yemas sobre su superficie mediante la síntesis continua de citoplasma y divisiones nucleares repetidas. Después de que una yema se desarrolla hasta cierto punto e incluso antes de que se separe de la célula madre, es capaz de brotar mediante el mismo proceso. De esta forma se puede producir una cadena de células. Con el tiempo, los brotes individuales se desprenden de la célula madre y se convierten en células de levadura individuales. Los cogollos que se desprenden de una hifa de un hongo filamentoso se comportan como esporas; es decir, germinan, dando lugar cada uno a una estructura llamada tubo germinal, que se desarrolla en una nueva hifa (Padalia, 2020),

- **Fisión binaria**

La fisión binaria es un tipo de reproducción asexual que se observa típicamente en procariotas y algunos eucariotas unicelulares. En este método de reproducción asexual, hay una separación de la célula madre en dos nuevas células hijas. Este proceso ocurre con la división y duplicación de la materia genética de los padres en dos partes. Aquí, cada célula hija recibe una copia de su ADN padre. Es un método primario de reproducción en organismos procarióticos. La fisión binaria ocurre sin que se forme ningún aparato de huso en la célula. En este proceso, la única molécula de ADN comienza a replicarse y luego une cada copia a varias

partes de la membrana celular. Cuando la célula comienza a separarse, los cromosomas originales (reales) y replicados se separan (BYJUS, 2020).

Reproducción Sexual

En la reproducción sexual, los hongos forman esporas sexuales a través de meiosis. Este proceso involucra la unión de dos células sexuales de diferentes tipos de apareamiento, llevando a la formación de un cigoto que posteriormente sufre meiosis para producir nuevas esporas haploides. Este método genera variabilidad genética, importante para la adaptabilidad y supervivencia de los hongos (LibreTexts, 2022).

La reproducción sexual, una fuente importante de variabilidad genética, permite al hongo adaptarse a nuevos ambientes. El proceso de reproducción sexual entre los hongos es único en muchos sentidos. Mientras la división nuclear en otros eucariotas, como animales, plantas y protistas, implica la disolución y reformación de la membrana nuclear, en los hongos la membrana nuclear permanece intacta durante todo el proceso, aunque en algunas especies se encuentran lagunas en su integridad. El núcleo del hongo queda comprimido en su punto medio, y los cromosomas diploides se separan mediante fibras del huso formadas dentro del núcleo intacto. El nucléolo generalmente también se retiene y se divide entre las células hijas, aunque puede ser expulsado del núcleo o puede estar disperso dentro del núcleo, pero ser detectable (Wösten, 2019).

Según BYJUS, (2021) en los hongos, la reproducción sexual se produce frecuentemente en condiciones ambientales desfavorables. Según los tipos de apareamiento, se clasifican en dos tipos:

- **Homotálico:** Cuando ambos tipos de apareamiento están presentes en el mismo micelio. También se le llama autofértil.
- **Heterotálico:** Cuando ambos tipos de apareamiento están presentes en dos micelios diferentes.

BYJUS, (2021) menciona que existen muchas variaciones en la reproducción sexual de los hongos, que incluye las siguientes tres etapas.

- **Plasmogamia:** La fusión del protoplasma.
- **Cariogamia:** La fusión del núcleo.
- **Meiosis:** Ciclo celular implicado en la división nuclear.

2.2.2. CALIDAD DE SUELO

La calidad de suelo se encuentra determinado como la capacidad de apoyo del crecimiento de las plantas sin ocasionar la degradación del suelo o un quebranto ambiental. La calidad del suelo se define asignando su estado a las propiedades indispensables (capacidad) para su adaptación específica. Se entiende que en el concepto se localiza la capacidad del suelo para mantener la suficiencia en el futuro. Algunos llegan a estimar que la definición sobre la calidad del suelo incorpora dos conceptos: la calidad peculiar del suelo que se usa para la producción de los cultivos y la calidad activa afectada por el uso o la aplicación (Penn State Extension, 2023).

La salud del suelo es la base de las habilidades agrícolas productivas. El suelo fértil proporciona nutrientes esenciales para las plantas. Las características físicas importantes de la estructura y agregación del suelo permiten que el agua y el aire se infiltren y que las raíces exploren. La salud y la calidad del suelo son términos que se utilizan indistintamente para describir suelos que no sólo son fértiles, sino que también poseen propiedades físicas y biológicas beneficiosas (Penn State Extension, 2023).

Fertilidad del suelo

La fertilidad del suelo es la capacidad de un suelo para proporcionar los nutrientes que necesitan las plantas de cultivo para crecer. Los principales nutrientes que las plantas absorben del suelo incluyen nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Con frecuencia, necesitamos complementar los nutrientes del suelo añadiendo fertilizantes, estiércol o compost para un buen crecimiento de los cultivos.

Las plantas absorben muchos otros nutrientes del suelo, pero generalmente hay suficientes nutrientes secundarios en el suelo, por lo que no es necesario agregar más (AEFA, 2021).

La fertilidad de un suelo es la capacidad que presenta para facilitar los nutrientes indispensables para el crecimiento de las plantas. Los nutrientes primordiales que las plantas llegan a captar del suelo es el N, P, K, Ca y Mg. Por lo general se llega a complementar los nutrientes al momento de adherir un fertilizante y compost para las plantas tengan el desarrollo adecuado. Las plantas también ingieren nutrientes subsiguientes del suelo, pero no presenta una necesidad de incorporar más, ya que se encuentran en cantidades adecuadas dentro del suelo (Cherlinka, 2024).

Propiedades físicas

Estas establecen de gran medida la cabida de las personas para utilizarlo para muchos fines. El estado físico del suelo establece su dureza y soporte, facilidad de penetración aireación, capacidad de drenaje y almacenamiento, retención de nutrientes y plasticidad. Es necesario que los involucrados en el uso de la tierra comprendan los parámetros físicos del suelo, comprendan en qué medida y cómo afectan la progresión de las plantas, cuánto y cómo se modifican por la actividad antrópica, y comprendan la importancia de mantener la mejor condición física posible. características del estado del suelo (Infoagronomo, 2018).

Textura:

Los suelos generalmente se encuentran compuestos de una combinación de los tres tamaños de partículas. Los suelos se pueden clasificar como una de cuatro clases texturales principales: arenas; limos y arcillas. Estos se encuentran basadas en la proporción de tamaños de partículas que se encuentran en cada suelo. Un suelo con una buena estructura contiene unos valores entre un 40 - 60% de su volumen en espacio poroso o espacio vacío entre las partículas del suelo. El agua y el aire pueden entrar en estos espacios porosos las raíces pueden crecer en estos espacios (Perez, 2022).

y contaminantes y afecta la agilidad biológica, incluido el crecimiento de las plantas (Moorberg & Crouse, 2022).

Moorberg & Crouse, (2022) menciona que el desarrollo de la estructura del suelo está influenciado por:

- La cantidad y tipo de arcilla, así como los iones intercambiables en la arcilla.
- La cantidad y tipo de materia orgánica, que proporciona alimento a los hongos y bacterias del suelo y su secreción de agentes cementantes (polisacáridos).
- Vegetación, que produce materia orgánica y une partículas del suelo mediante el enraizamiento.

Madrid, (2021) menciona que la estructura del suelo generalmente se divide en uno de los siguientes grupos:

- **Granular:** Aproximadamente esférico, como nueces de uva. Por lo general, 1-10 mm de diámetro. Más común en los horizontes a, donde las raíces de las plantas, los microorganismos y los productos pegajosos de la descomposición de la materia orgánica unen los granos del suelo en agregados granulares.
- **Agregado:** Este tipo estructural a menudo no se incluye en las clasificaciones, pero representa un suelo donde algunos componentes granulares se han agregado, pero no en la medida en que se encuentran en las estructuras prismáticas o columnares.
- **Platy:** terrones planos que yacen horizontalmente en el suelo. La estructura laminar se puede encontrar en los horizontes a, b y c. Comúnmente ocurre en un horizonte a como resultado de la compactación.
- **Blocky:** Aproximadamente en forma de cubo, con superficies más o menos planas. Si los bordes y las esquinas permanecen afilados, lo llamamos bloques angulares. Si son redondeados, lo llamamos bloques subangulares. Los tamaños suelen oscilar entre 5 y 50 mm de ancho.

Las estructuras en bloques son típicas de los horizontes b, especialmente aquellos que presentan un elevado contenido de arcilla. Se forman por expansión y contracción repetidas de minerales arcillosos.

- **Prismático:** Bloques más grandes, alargados verticalmente, a menudo con cinco lados. Los tamaños son comúnmente de 10 a 100 mm de ancho. Las estructuras prismáticas ocurren comúnmente en los fragipanos.
- **Columnar:** Las unidades son similares a los prismas y están limitadas por caras verticales planas o ligeramente redondeadas. Las partes superiores de las columnas, en contraste con las de los prismas, son muy distintas y normalmente redondeadas.

Madrid, (2021) menciona que los suelos laminares y masivos han restringido el movimiento de aire y agua, mientras que los suelos granulares y agregados han mejorado el transporte de aire y agua, la estructura del suelo puede ser alterada por la actividad humana, incluyendo lo siguiente.

- Compactación, que conduce a una estructura laminar y en bloques.
- Cultivo, que rompe los agregados en la capa de arado, pero puede compactar capas más profundas
- Eliminación de vegetación, lo que reduce la agregación.
- Movimiento y manipulación excesivos del suelo, que pueden destruir los agregados o conducir a la compactación.
- Exceso de sodio, a menudo a través del riego, que dispersa el suelo y descompone la estructura.

Humedad:

La humedad del suelo es el agua almacenada en el suelo y se ve afectada por la precipitación, la temperatura, las características del suelo y más. Estos mismos factores ayudan a determinar el tipo de bioma presente y la idoneidad de la tierra para el cultivo. La salud de nuestros cultivos depende, entre otras cosas, de un suministro adecuado de

humedad y nutrientes del suelo. A medida que disminuye la disponibilidad de humedad, se altera la función y el crecimiento normales de las plantas y se reduce el rendimiento de los cultivos. Y, a medida que nuestro clima cambia, la disponibilidad de humedad se vuelve más variable (Keane, 2024).

Color:

El color del suelo está constituido de gran manera por la capacidad de materia orgánica, y, en algunos casos, la presencia de minerales específicos. El color del suelo no es un factor muy utilizado en las aplicaciones de aguas pluviales (FAO, 2023).

Densidad:

La densidad del suelo está relacionada con la composición mineral y orgánica de un suelo y con la distribución del suelo. La medida estándar de la densidad del suelo es la densidad aparente, definida como la proporción del peso de un suelo en relación con su volumen. Se expresa como una unidad de peso por volumen y normalmente se suele medir en unidades de g/cm^3 (Infoagronomo, 2022).

Porosidad:

La porosidad del suelo está inversamente enlazada con la densidad aparente. Un suelo productivo que presenta textura media, el espacio poroso total suele ser aproximadamente el 50% del volumen del suelo. Los rangos para la porosidad del suelo se muestran en la tabla adyacente. Aunque la porosidad no varía mucho entre las texturas del suelo, los valores de porosidad menos la capacidad de campo varía mucho, con valores mayores para suelos de textura gruesa (por ejemplo, arenas). La porosidad menos la capacidad de campo representa el espacio poroso disponible después de que el agua drene de un suelo por gravedad y, por lo tanto, se considera que es el límite superior del agua disponible para la planta, y el punto de marchitez se considera el límite inferior (Jardin de Nod, 2022).

La variación del tamaño de los poros igualmente promueve la actividad biológica al compartimentar el espacio de los poros, lo que reduce la competencia entre organismos, incluidos los microbios (Ingenierizando, 2023).

Permeabilidad:

Se refiere a la facultad del suelo que consiente que el agua o el aire fluyan o se transporten. La permeabilidad es importante para determinar el potencial del suelo para trabajos tales como las fosas sépticas (riesgo de que los patógenos ingresen a las aguas subterráneas) (Sistema Solar, 2019).

Propiedades químicas

Las propiedades químicas del suelo incluyen fósforo, nitrógeno, cationes principales, metales traza, capacidad de cambio de cationes, conductividad eléctrica, enzimas, materia orgánica y carbono, saturación de bases, salinidad, proporción de adsorción de sodio y pH (Kumaragamage et al., 2022).

Potencial de hidrogeno

El pH del suelo es un indicador de alcalinidad o acidez del suelo. Es una propiedad esencial del suelo que afecta la idoneidad de las plantas, la disponibilidad de nutrientes, la actividad de los microorganismos del suelo, el ciclo químico y la movilidad de contaminantes como los metales. El pH del suelo se puede controlar con medidas como la aplicación de la cantidad adecuada de fertilizante nitrogenado, encalado y prácticas de cultivo que mejoran la materia orgánica en el suelo (HANNA Instruments, 2024).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo es una medida de la capacidad del suelo para transmitir corriente eléctrica, esta propiedad está relacionada con la cantidad de sales disueltas en el suelo y puede variar según la cantidad y tipo de sales presentes, esta propiedad se utiliza como

indicador de la fertilidad del suelo, la salinidad y otros parámetros que afectan el crecimiento de las plantas (Soil Health, 2023).

Cambio Iónico

El cambio iónico está definido como un proceso revocable donde las partículas sólidas que se encuentran en el suelo atraen iones del proceso acuoso mientras que sueltan una porción igual de otro tipo de iones, logrando establecer el equilibrio entre los dos procesos. El intercambio de iones es causado por la inestabilidad eléctrica de las partículas que están presentes en el suelo. Para que se neutralice la carga, los iones se absorben, en la superficie de la partícula, luego están débilmente unidos a las partículas que están en el suelo y pueden reemplazarse por la solución del suelo (Edafología, 2022).

Contaminación del suelo

La contaminación del suelo está relacionada con la degradación química, esto genera una pérdida temporal o total de la fertilidad del suelo debido a la concentración acumulada de sustancias perjudiciales que aventajan la capacidad de amortiguación nativa del suelo y afectan de forma negativa a sus propiedades. Este almacenamiento suele ocurrir como resultado de actividades antropogénicas exógenas, también puede ocurrir de forma nativa o endógena, cuando los elementos químicos de las rocas son liberados por procesos de contaminación y concentrados en el suelo a niveles tóxicos. Tenemos un ejemplo de esto último en suelos altamente desarrollados formados sobre rocas serpenteantes que son ricas en metales pesados como Cr, Ni, Cu y Mn, etc. Estos metales pesados se concentran en el suelo a medida que la fuerte acción del suelo arrastra a otros. Sustancias necesarias como Ca, Mg e incluso Sí. A medida que aumenta la concentración de tales residuos metálicos, estos elementos, los componentes inicialmente inasimilables del mineral primario, se transforman en formas más reactivas, solubles y biológicamente disponibles, lo que afecta negativamente la actividad biológica. El tipo de suelo también juega un papel en su distribución. Por ejemplo, ciertos contaminantes pueden llegar a las fuentes de agua del

subsuelo más fácilmente en la arena que en la arcilla. Esto se debe a las tasas de infiltración más rápidas de los tipos de suelos arenosos de grano grueso. Los suelos que son arcillosos de grano fino o el material orgánico en los suelos superficiales pueden detener los contaminantes con fuerza, lo que significa que los contaminantes se acumularán si no se alteran (es decir, sin excavación ni labranza (Iberdrola, 2023)).

Recuperación de suelos

En búsqueda de querer conservar el suelo como un medio nativo donde se sostiene tanto la agricultura como el ambiente natural, esto ha venido atravesando dentro de la humanidad en su conjunto, con el tiempo exige unas cuotas más elevadas de bienestar, por ende, la condición del ambiente. La polución de los suelos y la restauración de estos son uno de los trabajos pendientes de poner en práctica y de resolución, donde los investigadores y científicos tienen el trabajo de desenvolver tanto el entendimiento científico como la base sólida para el crecimiento de la tecnología que se requiere para la fijación, por parte de las administraciones públicas y los técnicos de las técnicas indicadas para la reparación de suelos contaminados. El objetivo de la restauración de suelos afectados es lograr unos niveles que sean admitibles para la salud y particularidad del suelo, esto se entiende como la suficiencia del suelo para poder conservar las capacidades y habilidades de su fertilidad y de la calidad ambiental y así beneficiar a la salud animal y vegetal. Las técnicas microbiológicas de restauración de suelos se basan en la transformación, atenuación, eliminación de sustancias contaminantes, por medio del uso de microorganismos vivos. Los procesos biológicos de restauración (biorrecuperación) utilizan los sistemas biológicos o microorganismos para poder degradar o transformar los contaminantes que afectan al suelo de maneras menos tóxicas haciéndolos nocivos o disminuyendo sus niveles por abajo de los límites permitidos para los contaminantes, logran repotenciar los métodos aborígenes del suelo logrando fomentar su recuperación. Precisamente, la fitorecuperación radica en el uso mezclado de enmiendas del suelo y de las plantas, junto con habilidades agrónomas para restaurar un suelo degradado. Por otra

parte, las fitotecnologías han generado últimamente un mayor interés en estos temas, las fitotecnologías son procesos limpios y también son económicamente viables, aparte que es un proceso medioambiental y son socialmente aceptables, aunque un poco más lentas (SECS, 2018).

El discernimiento científico sobre la biorrecuperación de los suelos se ha desarrollado desde la intuición básica del suelo, las circunstancias precisas a cerca del nivel de contaminación y toxicidad, el estado edafológico y lo ambiental, el reconocimiento de las especies vegetales que llegan a coincidir con el entorno, la necesidad de revisión para la distribución de la materia orgánica y los nutrientes para apoyar la acción microbiológica del suelo acerca de la recuperación del suelo, estudios sobre la interacción de los microorganismos afiliados, que es el aspecto en crecimiento. Es decir, se debe tener en cuenta al ecosistema de forma total aparte de los componentes individuales que presentan, por consiguiente, se presenta un desarrollo de las soluciones que son acoplados a las condiciones edafoclimaticas determinados en cada caso. Esta tecnología tiene por finalidad recuperar es estado confortable del suelo para facilitar el uso, es decir, equilibrar el valor del suelo recuperado dentro de una característica clave para afirmar la posibilidad de la biorrecuperación. En el decurso de los últimos años, la mayor parte de los estudios se enfocaron en tratar de recuperar los suelos degradados en cambio de eliminarlos. La restauración de los suelos generalmente se logra separándolo en un vertedero convenientemente segregado y dominado porque otros procesos de remediación no aportan suficiente garantía del control de la contaminación. En la actualidad se conocen distintos métodos para la remediación de suelos infectados, algunas de uso generalizado y otras aún experimentales, que tienen como objetivo secuestrar o destruir contaminantes cambiando su composición química mediante procesos generales biológicos, térmicos, químicos. La aplicación depende de las peculiaridades de la contaminación y el suelo, el impacto que se espera de cada tratamiento, la viabilidad económica y el tiempo de desarrollo esperado (Xiong, 2015).

Depende de cómo se usen los métodos de remediación de los suelos se verán los cambios, existe la remediación de tratamiento in situ, esta técnica básicamente actúa sobre los contaminantes donde se encuentran y el tratamiento ex situ, requiere profundizar o picar el suelo para que puedan eliminarse los contaminantes. La técnica in situ necesita menor tratamiento, pero este suele ser más lento y más complicado de poner en marcha ya que es complicado poner el agente de limpieza en contacto cercano con toda la masa del suelo contaminado, en cambio, la técnica ex situ es mucho más costoso, pero su ventaja es que es mucho más veloz, a menudo suele permitir una recuperación de suelo más completa de la zona contaminada (Traxco, 2013).

Estándares de calidad ambiental del suelo

Tabla 1

Estándares de calidad ambiental del suelo

Parámetros en mg/kg PS	Usos del suelo			Métodos de ensayo
	Suelo Agrícola	Suelo Residencial / Parques	Suelo Comercial / Industrial Extractivo	
ORGÁNICOS				
Hidrocarburos aromáticos volátiles				
Benceno	0,03	0,03	0,03	EPA 8260 EPA 8021
Tolueno	0,37	0,37	0,37	EPA 8260 EPA 8021
Etilbenceno	0,082	0,082	0,082	EPA 8260 EPA 8021
Xilenos	11	11	11	EPA 8260 EPA 8021
Hidrocarburos poliaromáticos				
Naftaleno	0,1	0,6	22	EPA 8260 EPA 8021 EPA 8270
Venzo(a) pireno	0,1	0,7	0,7	EPA 8270
Hidrocarburos de petróleo				

Fracción de hidrocarburos F1 (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 (>C10-C28)	1200	1200	5000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 (>C28-C40)	3000	3000	6000	EPA 8015
Compuestos organoclorados				
Bifenilos policlorados – PCB	0,5	1,3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetracloroetileno	0,1	0,2	0,5	EPA 8260
Tricloroetileno	0,01	0,01	0,01	EPA 8260
INORGÁNICOS				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total	750	500	2000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060 / EPA 7199 o DIN EN 15192
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 o 200.8
plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051
Cianuro libre	0,9	0,9	8	EPA 9013 SEMWW- AWWA-WEF 4500 CN F o ASTM D7 7237 y/o

Nota. Según el D.C. N° 011-2017-MINAM el gráfico representa los estándares de calidad ambiental según el tipo de suelo. El Peruano (2017).

2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES

Biotecnología

La biotecnología es un campo diverso que implica trabajar con células vivas o utilizar moléculas derivadas de ellas para aplicaciones orientadas al bienestar humano utilizando diversos tipos de herramientas y tecnologías. Es una fusión de la ciencia biológica con la ingeniería mediante la cual organismos vivos, células o partes se utilizan para la producción de productos y servicios (Gupta et al., 2017).

Setas

Los hongos son grupos muy diversos de microorganismos eucariotas que varían mucho en tamaño, forma y complejidad. La arquitectura ramificada y el crecimiento indeterminado de los micelios de los hongos terrestres optimizan la capacidad de búsqueda de alimento para explorar grandes volúmenes de suelo y explotar sustratos orgánicos heterogéneos y distribuidos en parches (Morton, 2021).

Bioacumulación

La bioacumulación de hongos se refiere al proceso mediante el cual los hongos absorben y retienen sustancias químicas, como metales pesados, contaminantes orgánicos y otros compuestos, en sus tejidos. Este fenómeno puede ocurrir cuando los hongos crecen en ambientes contaminados y absorben estas sustancias a través de sus estructuras celulares (Riopedre et al., 2021).

Micelio

El micelio en los hongos es la estructura vegetativa de los hongos que está formada por una red de filamentos tubulares llamados hifas. El micelio transporta nutrientes del medio ambiente a los hongos y también es donde los hongos envían esporas durante su fase de vida reproductiva asexual, la función del micelio es proporcionar una red de carreteras que permitan el transporte y la absorción de nutrientes (Ford & Cena, 2023).

Suelo

El suelo es el medio poroso biológicamente activo que se ha desarrollado en la capa superior de la corteza terrestre, el suelo es uno de los principales sustratos de la vida en la Tierra, ya que sirve como depósito de agua y nutrientes, como medio para la filtración y descomposición de desechos nocivos y como participante en el ciclo del carbono y otros elementos a través del ecosistema global (Sposito, 2024).

Plomo

El plomo es un metal pesado frecuente que contamina el medio ambiente y se acumula en el cuerpo humano mediante absorción, biodisponibilidad, bioconcentración y biomagnificación, ha estado vinculado a las actividades humanas durante años y es perjudicial para la salud, las características físicas y químicas distintivas del plomo lo hacen ideal para una variedad de usos (Collin et al., 2022).

Parámetros físicos

Las propiedades físicas del suelo son de gran importancia para determinar la abundancia de microbios. La diversidad microbiana varía según la textura del suelo. Los suelos arenosos sustentan la comunidad de hongos, mientras que los suelos arcillosos son propicios para la comunidad bacteriana (Rucks et al., 2004).

Parámetros químicos

El parámetro químico del suelo tiene que ver con el equilibrio correcto de los nutrientes disponibles en el suelo, esto está determinado en gran medida por el contenido de materia orgánica y su porcentaje de humus; este es el almacén de nutrientes en cualquier zona, las propiedades químicas de los suelos incluyen: materias inorgánicas del suelo, materias orgánicas del suelo, propiedades coloidales de las partículas del suelo y reacciones del suelo y acción amortiguadora (Borges et al., 2012).

Relaves mineros

Los relaves son residuos finamente molidos de la extracción de minerales, el tamaño de grano de los relaves depende de la naturaleza del mineral y del proceso de molienda, después de extraer de la tierra el mineral

que contiene un producto económicamente recuperable, ese producto se extrae en una planta de procesamiento o molino. Una vez que el producto de valor se extrae del material mineral, el flujo de desechos resultante se denomina relaves (Chávez & Molina, 2023).

2.4. HIPÓTESIS

H₁: El efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* presenta un cambio significativo sobre la calidad de suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina.

H₀: El efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* no presenta un cambio significativo sobre la calidad de suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina.

2.5. VARIABLES

2.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Tratamiento por micorremediación.

2.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Calidad de suelo.

2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 2

Operacionalización de variables

Variable de calibración	Indicadores	Valor Final	Tipo de variable
Micorremediación	Tiempo de medición	Medición inicial sin el <i>Agaricus bisporus</i> (0 días)	Nominal dicotómica
		Segunda medición con el <i>Agaricus bisporus</i> (35 días)	
		Tercera medición con el <i>Agaricus bisporus</i> (40 días)	
	Densidad de semillas de <i>Agaricus bisporus</i>	Gramos	
	Periodo de tratamiento	Día/Mes	
	Supervivencia del hongo	Día/Mes	
Variable evaluativa	Indicadores	Valor Final	Tipo de variable
Calidad de suelo	Parámetros físicos		Numérica continua
	• Textura	% de (arena, limo y arcilla)	
	Parámetros químicos		
	• Capacidad de intercambio catiónico	meq/100 grs	
	• Potencial de hidrogeno	pH	
	• Concentración de plomo	ppm de Pb	
	• Conductividad eléctrica	µmho/cm	

Nota. En la tabla se muestra la operacionalización de variables.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es con intervención por parte del investigador; por otro lado, de acuerdo al control de las mediciones de la variable es Prospectivo porque se va a utilizar información de acuerdo al criterio del investigador; en base al número de mediciones de la variable estudiada es Longitudinal ya que se va a analizar el cambio de las variables a través del tiempo; según el número de variables es Analítico porque la investigación presenta más de una variable (Supo & Zacarías, 2020).

3.1.1. Enfoque

El enfoque de este estudio fue cuantitativo porque se va a realizar análisis de datos estadísticos. La estadística será una herramienta de la investigación (Supo & Zacarías, 2020).

3.1.2. Alcance o Nivel

La investigación fue de nivel explicativo porque se va a evaluar el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente (Supo & Zacarías, 2020).

3.1.3. Diseño

El diseño de este estudio fue completamente aleatorizado de un solo factor. También es prospectivo, longitudinal y analítico (Supo & Zacarías, 2020).

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + D_j + (T_i \times D_j) + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} : Nivel de plomo observado en el suelo en el tiempo i , con dosis j , en la repetición k

μ : Media general del experimento

T_i : Efecto del tiempo de evaluación (0 días, 35 días, 40 días)

D_j : Efecto de la dosis de *Agaricus bisporus* (10g, 20g, 30g, 40g)

$(T_i \times D_j)$: Interacción entre el tiempo y la dosis

ε_{ijk} : Error aleatorio

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

La población de estudio es el suelo contaminado proveniente de la minera Huancamina, en el distrito de Jacas Chico, provincia de Yarowilca, departamento de Huánuco. En el anexo cinco se presenta el plano de ubicación de la zona desde la cual se obtuvo el suelo contaminado.

3.2.2. Muestra

Para la muestra de estudio se tomó 5 muestras de suelo de 4 parcelas diferentes, cada parcela tuvo una medida de 3 metros por 3 metros previamente seleccionada del terreno contaminado, se realizaron calicatas de 15 centímetros de profundidad por 15 centímetros de largo y 15 centímetros de ancho consiguiendo un total de 101,250 kilogramos de suelo contaminado y este suelo contaminado fue distribuido en 4 macetas de vidrio con un volumen máximo de 14 kilogramos (la maceta es de 20 cm de ancho x 35 cm de largo x 20 cm de alto).

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 3

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Variable	Indicadores	Técnica	Instrumentos
Calidad del suelo	Parámetros físicos		
	• Textura		• Volumen de sedimentación
	Parámetros químicos		
	• Capacidad de intercambio catiónico	Observación	• Reacción química
	• Potencial de hidrogeno		• pH-metro
	• Plomo		• Espectroscopia de absorción atómica
	• Conductividad eléctrica		• Conductímetro

Nota. En la tabla se muestran las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.3.1. Protocolo de trabajo

Para la ejecución del proyecto, se inició con la recolección de muestras de suelo de cuatro parcelas distintas dentro de la localidad de Huancamina, cada una con niveles considerables de contaminación por plomo. La extracción de las muestras se realizó mediante calicatas de 15 cm de profundidad, 15 cm de largo y 15 cm de ancho. En total, se obtuvieron 101,250 kilogramos de suelo contaminado de las cuatro parcelas. De esta cantidad, se seleccionaron 17,250 kilogramos de cada parcela, los cuales fueron almacenados en bolsas de polietileno densas y posteriormente sellados en baldes herméticos para evitar cualquier alteración externa. El suelo restante fue reservado para la muestra de control. Para los análisis iniciales, se tomó un kilogramo de suelo de cada balde, etiquetando correctamente cada muestra antes de su envío al laboratorio de la UNAS, donde se realizaron las pruebas para obtener los datos del pre-test.

En la siguiente fase del experimento, los 16,250 kilogramos de suelo restante de cada parcela fueron transferidos a macetas de vidrio con dimensiones de 20 cm de ancho, 35 cm de largo y 20 cm de alto. A fin de optimizar la actividad del hongo *Agaricus bisporus*, se mezcló la tierra con granos de arroz, lo que permitió aumentar su eficacia y resistencia. Posteriormente, se procedió a sembrar las semillas del hongo en las macetas. Para garantizar la variabilidad en los resultados, cada maceta se dividió con una plancha de vidrio en dos secciones, estableciendo un total de ocho zonas experimentales. Se distribuyeron las semillas de *Agaricus bisporus* de la siguiente manera: en la primera maceta se sembraron 10 gramos, en la segunda 20 gramos, en la tercera 30 gramos y en la cuarta 40 gramos, replicando esta distribución en ambas mitades de cada maceta. Para preservar la humedad y asegurar condiciones óptimas de crecimiento, las macetas fueron selladas con film plástico.

El período de vida del hongo se extendió por aproximadamente un mes y dos semanas, lapso en el que se monitoreó constantemente su desarrollo. Al finalizar este tiempo, las setas fueron retiradas de las

macetas y se procedió a la toma de nuevas muestras de suelo. Para ello, se extrajeron dos kilogramos de tierra por maceta (un kilogramo por cada mitad), asegurando que cada muestra fuera debidamente etiquetada y almacenada en bolsas de polietileno densas con capacidad de un kilogramo cada una. Estas muestras fueron enviadas nuevamente al laboratorio de la UNAS para la realización de los análisis post-test, con el propósito de evaluar los cambios en la calidad del suelo y determinar si los niveles de plomo habían disminuido por debajo de los límites aceptables. Asimismo, este procedimiento permitió evaluar con precisión la capacidad micorremediadora de *Agaricus bisporus* en la transformación y bioacumulación de los metales pesados presentes en el suelo contaminado.

3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La primera técnica que se empleó en el proyecto de investigación para poder ejecutar el proceso de los datos fue el software Excel para reunir los datos que se emplearon en el estudio, esto permitió que en cada fase del proyecto se creen gráficos y tablas de los resultados más sobresalientes, también se utilizó el programa IBM SPSS versión 27 en los resultados para el procesamiento estadístico de los datos obtenidos en la investigación, con esta herramienta, se realizaron pruebas de normalidad y cálculos de medias y desviaciones estándar, permitiendo interpretar de manera objetiva los cambios en la calidad del suelo antes y después de la aplicación de *Agaricus bisporus*, otro programa utilizado fue el ANOVA en los resultados para evaluar si existían diferencias significativas entre las mediciones de las variables del suelo antes y después de la micorremediación con el *Agaricus bisporus*, mediante este análisis estadístico, se calcularon si los cambios observados en la concentración de plomo, el pH, la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico eran estadísticamente significativos, lo que permitió validar el impacto de la seta en la mejora de la calidad del suelo contaminado, otro programa que se utilizó como una técnica para el estudio fue el QGIS con el fin de detallar la ubicación y los puntos donde se realizó la recolección y el monitoreo en la zona de aplicación y estudio del proyecto.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

Tabla 4

Niveles de plomo según análisis

Tratamiento	Repetición 1 (Pb ppm)	Repetición 2 (Pb ppm)	Repetición 3 (Pb ppm)	Repetición 4 (Pb ppm)	Promedio (ppm)
Sin intervención (0 días)	41.11	44.32	44.40	43.88	43.43
T1 <i>A. bisporus</i> (35 días)	15.62	16.82	12.44	13.63	14.63
T2 <i>A. bisporus</i> + arroz (40 días)	15.14	16.37	12.85	13.56	14.48

Nota. Datos de análisis donde se visualiza los niveles de plomo.

El análisis revela que la mayor concentración inicial de plomo se registró en la repetición 3, con un valor de 44.40 ppm. Sin embargo, tras la aplicación de los tratamientos, esta misma repetición presentó también la mayor reducción, alcanzando los niveles más bajos de plomo entre todas las muestras evaluadas. (Ver en el anexo 2, 3 y 4).

Tabla 5

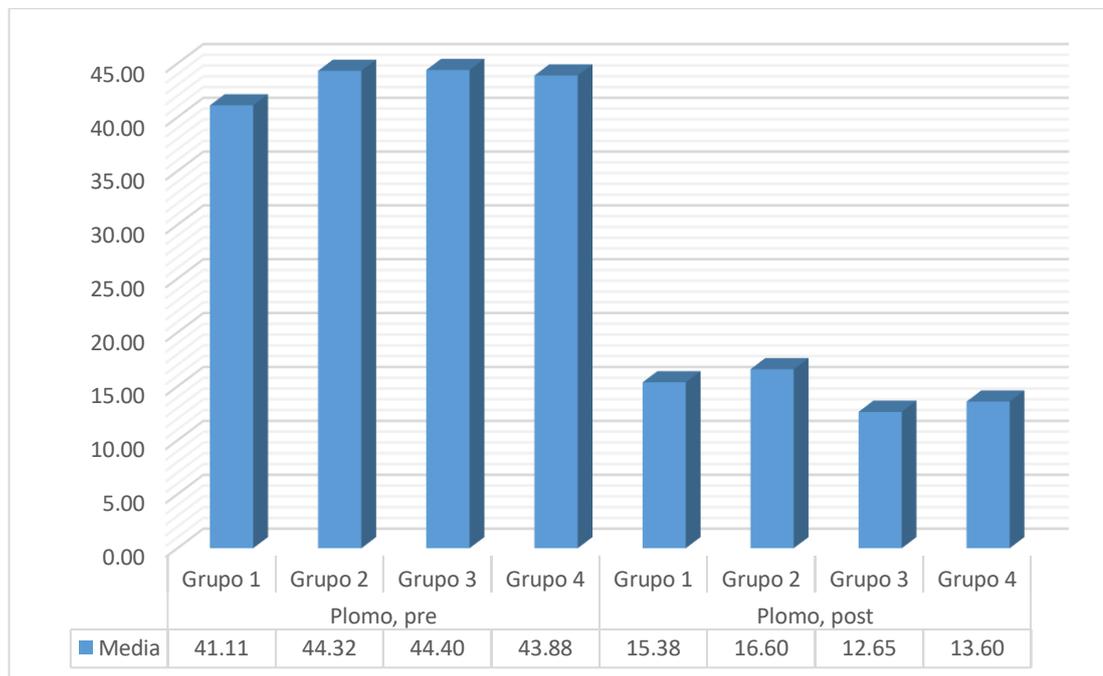
*Descripción del porcentaje de plomo del suelo antes y después de la micorremediación con la seta *Agaricus bisporus**

Indicador	Grupo	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Plomo, pre	Grupo 1	41.11	0.00	41.11	41.11
	Grupo 2	44.32	0.00	44.32	44.32
	Grupo 3	44.40	0.00	44.40	44.40
	Grupo 4	43.88	0.00	43.88	43.88
Plomo, post	Grupo 1	15.38	0.24	12.33	18.43
	Grupo 2	16.60	0.23	13.74	19.45
	Grupo 3	12.65	0.21	10.04	15.25
	Grupo 4	13.60	0.04	13.15	14.04

Nota. Datos procesados con SPSS versión 27.

Figura 4

Descripción del porcentaje de plomo del suelo antes y después de la micorremediación con la seta Agaricus bisporus



Nota. Datos procesados con SPSS versión 27.

El análisis indica que en el grupo 3 se ha dado una mayor reducción de la concentración de plomo, desde 44.40 ppm a 12.65 ppm, una reducción de 71.5%.

Tabla 6

Descripción de las propiedades físicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta Agaricus bisporus

Indicador	Grupo	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Arena, pre	Grupo 1	64.60	0.00	64.60	64.60
	Grupo 2	60.80	0.00	60.80	60.80
	Grupo 3	60.50	0.00	60.50	60.50
	Grupo 4	63.90	0.00	63.90	63.90
Arena, post	Grupo 1	62.20	0.60	54.58	69.82
	Grupo 2	63.15	1.65	42.18	84.12
	Grupo 3	63.90	0.70	55.01	72.79
	Grupo 4	61.80	0.50	55.45	68.15
Limo, pre	Grupo 1	15.30	0.00	15.30	15.30
	Grupo 2	16.10	0.00	16.10	16.10
	Grupo 3	16.70	0.00	16.70	16.70

	Grupo 4	16.40	0.00	16.40	16.40
Limo, post	Grupo 1	15.95	0.35	11.50	20.40
	Grupo 2	16.85	0.55	9.86	23.84
	Grupo 3	16.65	0.45	10.93	22.37
	Grupo 4	15.75	0.55	8.76	22.74
Arcilla, pre	Grupo 1	20.10	0.00	20.10	20.10
	Grupo 2	23.10	0.00	23.10	23.10
	Grupo 3	22.80	0.00	22.80	22.80
	Grupo 4	19.70	0.00	19.70	19.70
Arcilla, post	Grupo 1	21.80	0.90	10.36	33.24
	Grupo 2	20.00	2.20	-7.95	47.95
	Grupo 3	19.45	1.15	4.84	34.06
	Grupo 4	22.45	1.05	9.11	35.79

Nota. Datos procesados con SPSS versión 27.

Los datos indican que la mayor variación en el post test, con respecto al pre test se ha dado en la arena, desde 60.80% a 63.15, en el grupo 2, en el limo, la mayor variación se dio en el grupo 1, desde 15.30% a 15.95%, por último, en la arcilla, la mayor variación se dio en el grupo 3, desde 22.80% a 19.45%.

Tabla 7

*Descripción de las propiedades químicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta *Agaricus bisporus**

Indicador	Grupo	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
pH, pre	Grupo 1	5.75	0.00	5.75	5.75
	Grupo 2	5.92	0.00	5.92	5.92
	Grupo 3	5.98	0.00	5.98	5.98
	Grupo 4	5.80	0.00	5.80	5.80
pH, post	Grupo 1	6.30	0.05	5.60	6.99
	Grupo 2	6.48	0.04	5.97	6.99
	Grupo 3	6.40	0.08	5.38	7.42
	Grupo 4	6.73	0.07	5.77	7.68
Conductividad eléctrica, pre	Grupo 1	0.24	0.00	0.24	0.24
	Grupo 2	0.33	0.00	0.33	0.33
	Grupo 3	0.45	0.00	0.45	0.45
	Grupo 4	0.18	0.00	0.18	0.18
	Grupo 1	1.29	0.01	1.16	1.42

Conductividad eléctrica, post	Grupo 2	1.25	0.01	1.12	1.38
	Grupo 3	1.23	0.02	1.03	1.42
	Grupo 4	1.31	0.02	1.11	1.50
CIC, pre	Grupo 1	9.81	0.00	9.81	9.81
	Grupo 2	9.52	0.00	9.52	9.52
	Grupo 3	9.48	0.00	9.48	9.48
	Grupo 4	9.18	0.00	9.18	9.18
CIC, post	Grupo 1	15.71	0.56	8.65	22.76
	Grupo 2	15.86	0.42	10.58	21.13
	Grupo 3	15.37	0.02	15.12	15.62
	Grupo 4	17.10	0.52	10.49	23.71

Nota. Datos procesados con SPSS versión 27.

El análisis indica que en el grupo 4, se dio la mayor variación del pH, desde 5.80 a 6.73. En el grupo 4, también se dio la mayor modificación de la conductividad eléctrica, desde 0.18 a 1.31. Por último, en el grupo 4, también se dio la mayor modificación del CIC, desde 9.18 a 17.10

Tabla 8

Prueba de normalidad de los datos con Kolmogorov-Smirnov

		Arena	Limo	Arcilla	pH	CE	CIC	Plomo
N		8	8	8	8	8	8	8
Parámetros normales ^{a,b}	Media	62,7	16,3	20,9	6,4	1,2	16,0	14,58
	Desv. Desviación	1,36	,71	2,01	,18	,036	,83	1,60
Máximas diferencias extremas	Absoluta	,17	,25	,186	,15	,149	,251	,21
	Positivo	,17	,25	,154	,153	,149	,251	,21
	Negativo	-,161	-,19	-,186	-,10	-,134	-,15	-,13
Estadístico de prueba		,17	,25	,186	,15	,149	,251	,21
Sig. asin. (bilateral) ^c		,20	,15	,200 ^d	,20	,200 ^d	,148	,20
Sig.		,64	,15	,574	,8	,862	,149	,3
Sig. Monte Carlo (bilateral) ^e	Intervalo de confianza al 99%							
	Límite inferior	,6	,14	,5	,8	,853	,139	,3
	Límite superior	0,65	0,16	0,58	0,84	0,87	0,15	0,3

Nota. Datos procesados con SPSS versión 27.

Debido a que, en la prueba de normalidad, los p-valor superan el 5% del nivel de significancia, entonces se dice que los datos siguen una distribución que se aproxima a la distribución normal.

4.2. PRUEBA Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

H₁: El efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* presenta un cambio significativo sobre la calidad de suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina.

H₀: El efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* no presenta un cambio significativo sobre la calidad de suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina.

Tabla 9

Prueba de hipótesis con ANOVA con un factor intersujetos

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Arena, post	Entre grupos	5,374	3	1,791	,937	0,501
	Dentro de grupos	7,645	4	1,911		
	Total	13,019	7			
Limo, post	Entre grupos	1,700	3	,567	1,219	0,411
	Dentro de grupos	1,860	4	,465		
	Total	3,560	7			
Arcilla, post	Entre grupos	12,245	3	4,082	1,011	0,475
	Dentro de grupos	16,150	4	4,037		
	Total	28,395	7			
pH, post	Entre grupos	,201	3	,067	8,052	0,036
	Dentro de grupos	,033	4	,008		
	Total	,234	7			
Conductividad Eléctrica, post	Entre grupos	,008	3	,003	8,256	0,035
	Dentro de grupos	,001	4	,000		
	Total	,009	7			
CIC, post	Entre grupos	3,429	3	1,143	3,044	0,155
	Dentro de grupos	1,502	4	,376		
	Total	4,932	7			
Plomo, post	Entre grupos	18,824	3	6,275	82,847	0,000

Dentro de grupos	,303	4	,076
Total	19,127	7	

Nota. Datos procesados con SPSS versión 27.

La prueba nos indica que existe diferencia en los resultados obtenidos en el pH, la conductividad eléctrica y en la concentración de plomo.

Tabla 10

Evolución del plomo

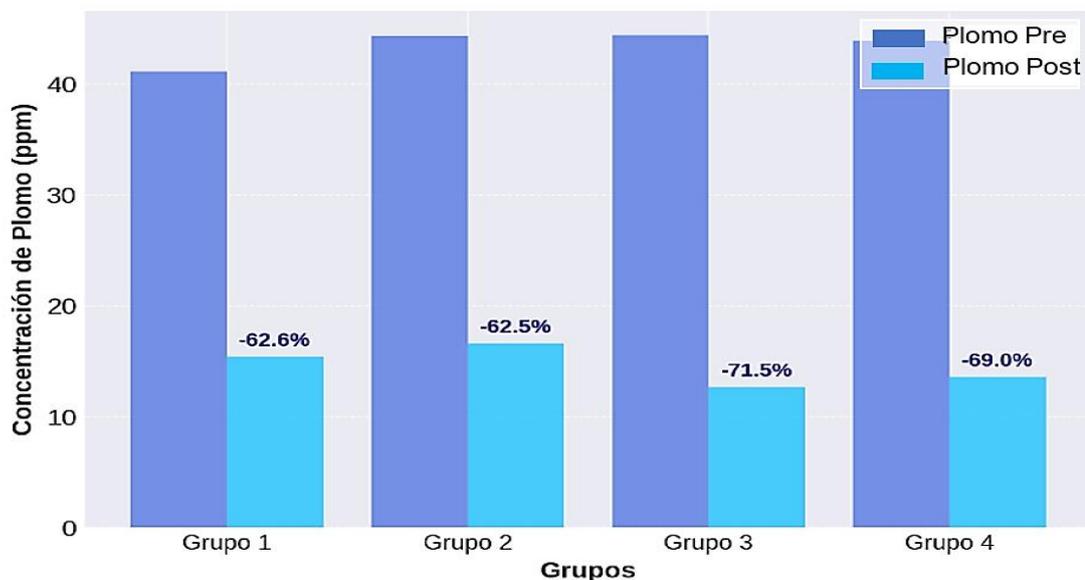
Grupo	Plomo pre (ppm)	Plomo post (ppm)	Reducción (%)
Grupo 1	41.11	15.38	62.6 %
Grupo 2	44.32	16.60	62.5 %
Grupo 3	44.40	12.65	71.5 %
Grupo 4	43.88	13.60	69.0 %

Nota. Se observa la evolución del plomo.

Los resultados muestran que el uso de *Agaricus bisporus* logró reducir significativamente la concentración de plomo en el suelo en los cuatro grupos evaluados, con reducciones que oscilaron entre 62.5% y 71.5%. El Grupo 3 presentó la mayor eficiencia, disminuyendo de 44.40 ppm a 12.65 ppm (71.5% de reducción), seguido por el Grupo 4 con un 69.0%, mientras que los Grupos 1 y 2 redujeron en 62.6% y 62.5%, respectivamente.

Figura 5

Reducción del plomo



Nota. Muestra la evolución de la concentración de plomo en el suelo antes y después.

El grafico muestra la evolución de la concentración de plomo en el suelo antes y después de la micorremediación con *Agaricus bisporus* en los cuatro grupos experimentales. Se observa una reducción significativa en todos los casos, con una disminución más pronunciada en el Grupo 3, donde la concentración bajó de 44.40 ppm a 12.65 ppm, lo que representa una reducción del 71.5%. El Grupo 4 también mostró una alta eficiencia, con una reducción del 69.0%, mientras que los Grupos 1 y 2 presentaron disminuciones del 62.6% y 62.5%, respectivamente.

Tabla 11

Prueba de hipótesis con ANOVA con un factor intersujetos

Indicador	Normativa	Pre test	Interpretación	Post - test				Interpretación
				Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	
pH	5.5 - 7.5	Grupo 1 5.75	Si cumple antes del experimento	6.30	6.48	6.40	6.73	Ahora también cumple
		Grupo 2 5.92						
		Grupo 3 5.98						
		Grupo 4 5.80						
Conductividad eléctrica	≤ 4.0 dS/m	Grupo 1 0.24	Si cumple antes del experimento	0.24	0.33	0.45	0.18	Ahora también cumple
		Grupo 2 0.33						
		Grupo 3 0.45						
		Grupo 4 0.18						
Plomo	≤ 70 mg/kg	Grupo 1 41.11	Si cumple antes del experimento	15.38	16.60	12.65	13.60	Ahora también cumple
		Grupo 2 44.32						
		Grupo 3 44.40						
		Grupo 4 43.88						

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. DISCUSIÓN DEL OBJETIVO GENERAL

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* en suelos contaminados con plomo en la localidad de Huancamina. Los resultados obtenidos demostraron que la micorremediación con *A. bisporus* fue efectiva en la reducción de los niveles de plomo, observándose una disminución significativa en todos los grupos analizados. Este hallazgo confirma que el hongo tiene una alta capacidad de bioacumulación y puede ser una alternativa viable para la recuperación de suelos impactados por metales pesados.

El mecanismo de remediación de *A. bisporus* está relacionado con su capacidad de adsorción y bioacumulación, lo cual ha sido documentado en estudios previos. En la presente investigación, los niveles de plomo disminuyeron en más del 70% en algunos grupos, lo que resalta la eficacia del proceso. La eficiencia de *A. bisporus* podría deberse a la presencia de compuestos bioactivos que facilitan la captación del metal pesado, así como a la secreción de enzimas específicas que pueden transformar o estabilizar el plomo en formas menos tóxicas.

Comparación con antecedentes

- **He et al. (2022)** investigaron la bioacumulación de cadmio en *A. bisporus* y encontraron que este hongo puede tolerar altas concentraciones de Cd hasta 414,28 mg/kg, además de acumular el metal en su biomasa. Este hallazgo es comparable al presente estudio, ya que demuestra que *A. bisporus* puede ser utilizado en la biorremediación de diferentes metales pesados. Sin embargo, el estudio de He et al. se centró en Cd, mientras que el presente trabajo aborda la remediación de Pb.
- **Hidalgo et al. (2023)** evaluaron la micorremediación con *A. bisporus* y *Pleurotus ostreatus* en suelos contaminados con Pb y γ -HCH, mostrando que los sustratos inoculados con *A. bisporus* mejoraron significativamente las

condiciones del suelo. Este estudio corrobora los hallazgos del presente trabajo, ya que en ambos casos se observó un aumento en la calidad química del suelo tras la aplicación del hongo.

- **Vaca et al. (2023)** utilizaron residuos de *A. bisporus* en un proceso de compostaje para remediar suelos contaminados con diésel. Aunque el contaminante en este caso no es un metal pesado, el estudio demostró que los residuos del hongo pueden mejorar las propiedades del suelo, favoreciendo su recuperación y estabilidad. Este efecto es similar al observado en la presente investigación, donde se evidencia el potencial de los residuos orgánicos en la mejora de suelos degradados.

5.2. DISCUSIÓN DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Porcentaje de plomo antes y después de la micorremediación

Uno de los aspectos más relevantes del estudio fue la comparación de los niveles de plomo en el suelo antes y después de la micorremediación con *A. bisporus*. Los resultados indicaron una reducción significativa de la concentración de plomo, con un impacto mayor en el grupo 3, donde se observó una disminución del 71.5%.

El mecanismo por el cual *A. bisporus* reduce la concentración de plomo en el suelo puede explicarse por procesos de bioadsorción y bioacumulación. Durante el crecimiento del hongo, este absorbe el metal pesado y lo almacena en su biomasa, lo que permite su posterior eliminación mediante la cosecha del hongo. Además, la presencia de ciertos compuestos enzimáticos puede facilitar la transformación del plomo en formas menos biodisponibles.

Comparación con antecedentes

El estudio de Calderón (2022) sobre *Pleurotus ostreatus* en la remediación de metales pesados mostró reducciones del 75% al 99% para el plomo. Aunque el presente estudio demuestra que *A. bisporus* es altamente efectivo, los porcentajes obtenidos por *P. ostreatus* son más elevados. Esto sugiere que diferentes especies de hongos pueden tener capacidades diferenciadas de micorremediación, y futuros estudios podrían explorar la

combinación de ambos hongos para optimizar la eliminación de metales pesados.

b) Propiedades físicas del suelo antes y después de la micorremediación

El análisis de las propiedades físicas del suelo mostró cambios notables en la textura, con un incremento en las fracciones de arena y limo, y una ligera reducción en la cantidad de arcilla. Estos cambios pueden atribuirse a la actividad metabólica del hongo, que altera la estructura del suelo mediante la producción de sustancias extracelulares y la degradación de materia orgánica.

La micorremediación con *A. bisporus* también puede haber influido en la compactación y la aireación del suelo, mejorando su estructura y facilitando la filtración del agua. Estos efectos son cruciales para la regeneración del ecosistema, ya que un suelo menos compacto y con mayor porosidad favorece el crecimiento de plantas y la actividad microbiana beneficiosa.

Comparación con antecedentes

En el estudio de Núñez et al. (2023) sobre biomasa fúngica en la biorremediación de metales pesados, se encontró que la biomasa fúngica ayuda a estabilizar la estructura del suelo y mejora su capacidad para retener nutrientes. Esto se alinea con los resultados del presente estudio, donde se observó una mejoría en la estructura física del suelo tras la micorremediación con *A. bisporus*.

c) Propiedades químicas del suelo antes y después de la micorremediación

Los análisis químicos indicaron un aumento en el pH del suelo, lo que es beneficioso, ya que la acidez del suelo puede aumentar la biodisponibilidad de metales pesados, haciéndolos más tóxicos para los organismos vivos. Además, se observó un incremento en la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que sugiere una mayor disponibilidad de nutrientes esenciales.

Estos cambios pueden explicarse por la actividad de *A. bisporus*, que libera metabolitos y exudados que influyen en la química del suelo. La presencia de compuestos orgánicos derivados del hongo puede contribuir a la estabilización del plomo y otros elementos en formas menos solubles, lo que reduce su movilidad y toxicidad.

Comparación con antecedentes

El estudio de Gamarra (2022) sobre la aplicación de lodos residuales de *A. bisporus* en suelos contaminados con hidrocarburos mostró resultados similares, con mejoras en la retención de nutrientes y la actividad enzimática del suelo. Estos hallazgos coinciden con el presente estudio, ya que en ambos casos se observó un impacto positivo de *A. bisporus* en la calidad química del suelo.

CONCLUSIONES

- Se concluye que la aplicación de *Agaricus bisporus* logró una reducción significativa en la concentración de plomo en el suelo, con disminuciones de hasta un 71.5%, lo que confirma su eficacia como agente micorremediador en suelos contaminados. Este resultado demuestra que el hongo puede desempeñar un papel crucial en la rehabilitación de suelos impactados por metales pesados, contribuyendo a la reducción de la toxicidad del entorno y favoreciendo la restauración ecológica de las áreas afectadas.
- Se concluye que el experimento permitió observar una mejora en la calidad del suelo en términos de su contenido de plomo, iniciando con valores promedio de 44.40 ppm y reduciéndose hasta 12.65 ppm en el grupo más efectivo. Este hallazgo es relevante, ya que demuestra que el uso de *Agaricus bisporus* no solo es capaz de reducir la concentración de plomo en el suelo, sino que también puede ser implementado como una estrategia sostenible y de bajo costo para mitigar la contaminación ambiental.
- Se concluye que la aplicación de *Agaricus bisporus* generó modificaciones en la estructura del suelo, incrementando la aireación y reduciendo la compactación, lo que puede favorecer el crecimiento vegetal. La mejora en la porosidad y estabilidad del suelo sugiere que el hongo no solo actúa como agente descontaminante, sino que también contribuye a la regeneración de suelos degradados, facilitando el establecimiento de microorganismos benéficos y promoviendo la restauración de la biodiversidad edáfica.
- Se concluye que la aplicación del hongo mejoró las propiedades químicas del suelo, elevando el pH de 5.80 a 6.73 y aumentando la capacidad de intercambio catiónico, lo que contribuye a la estabilidad del ecosistema del suelo. La elevación del pH favorece la disminución de la toxicidad de metales pesados, mientras que el aumento en la capacidad de intercambio catiónico indica una mejor retención de nutrientes esenciales, facilitando condiciones más favorables para la vida microbiana y el crecimiento de plantas en suelos previamente contaminados.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda aplicar los hallazgos de este estudio en programas de remediación ambiental y restauración de suelos contaminados con metales pesados. El uso de *Agaricus bisporus* podría implementarse en zonas afectadas por la minería y la industria, contribuyendo a la reducción de la toxicidad del suelo y mejorando su fertilidad para usos agrícolas y forestales.
- Se recomienda tomar las precauciones necesarias en el proceso de cultivo de *Agaricus bisporus* para asegurar su crecimiento óptimo y evitar contaminaciones cruzadas. Se deben mantener condiciones adecuadas de temperatura, humedad y sustrato para maximizar la eficiencia del hongo en la remediación del suelo, reduciendo así posibles errores metodológicos en futuras investigaciones.
- Se recomienda a las autoridades locales capacitar a los pobladores en la aplicación de técnicas de micorremediación para la descontaminación del suelo. A través de talleres y programas educativos, se podría fomentar el uso de hongos como *Agaricus bisporus* para mejorar la calidad del suelo, beneficiando la salud pública y la producción agrícola de la región.
- Se recomienda a la Universidad de Huánuco la implementación de laboratorios especializados en biotecnología ambiental para facilitar la investigación en micorremediación. Contar con espacios equipados permitirá a los tesisistas realizar experimentos con mayor precisión, optimizar sus metodologías y contribuir al desarrollo de nuevas estrategias para la restauración ecológica de suelos contaminados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEFA. (2021). *Fertilidad del suelo*. Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes. <https://aefa-agronutrientes.org/fertilidad-del-suelo>
- Astete, J., Cáceres, W., Sabastizagal, I., Oblitas, T., Pari, J., & Rodríguez, F. (2019). Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aledañas a relaves mineros. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v26n1/a04v26n1.pdf>
- Borges, J., Barrios, M., Sandoval, E., Bastardo, Y., & Márquez, O. (2012). *Características físico-químicas del suelo y su asociación con macronutrientes en áreas destinadas a pastoreo en el estado Yucatán*. <https://acortar.link/aEA73w>
- Britannica. (2024). *Fungus—Spores, Hyphae, Reproduction*. <https://www.britannica.com/science/fungus/Reproductive-processes-of-fungi>
- BYJUS. (2020). *Binary Fission-A Mode of Asexual Reproduction*. BYJU'S Biology. <https://byjus.com/biology/binary-fission/>
- BYJUS. (2021). *Reproduction in Fungi-An Overview Of Sexual Reproduction*. BYJUS. <https://byjus.com/biology/sexual-reproduction-in-fungi/>
- Calderón, L. (2022). *Análisis de las aplicaciones de Pleurotus ostreatus como alternativa en la biorremediación de residuos mineros*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. <https://acortar.link/LZUTMU>
- CDC. (2024). *About Lead in Soil*. Childhood Lead Poisoning Prevention. <https://www.cdc.gov/lead-prevention/prevention/soil.html>

- Chávez, E., & Molina, F. (2023). *Relaves mineros: Descripción general*. ScienceDirect. <https://acortar.link/sQy1vJ>
- Cherlinka, V. (2024). *Fertilidad Del Suelo: Cómo Medirla Y Mejorarla*. <https://eos.com/es/blog/fertilidad-del-suelo/>
- ClientEarth. (2024). *Why soil matters*. <https://acortar.link/Vuqjno>
- Collin, S., Senthil, K., Kanimozhi, V., Muhammad, A., Sibiya, S., Jogannagari, A., Rajan, C., Vladislav, L., Gabriel, T., Fedor, S., Sivasankar, K., & Sasikumar, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
- Dutta, S., & Hyder, M. (2017). *Mycoremediation—A potential tool for sustainable management*. <https://acortar.link/9cX1X8>
- Eco360. (2023). *Guía completa: Cómo se reproducen los hongos*. <https://eco360.info/ciencia-y-naturaleza/guia-completa-como-se-reproducen-los-hongos/>
- Edafología. (2022). *Propiedades fisicoquímicas*. <https://acortar.link/uam9bA>
- El Peruano. (2017). *Normas legales*. <https://acortar.link/SL1RDo>
- FAO. (2023). *Propiedades Físicas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Fereshteh, M., & Mehdi, R. (2022). *Respuesta de crecimiento y micorremediación de metales pesados por el hongo Pleurotus sp.* <https://www.nature.com/articles/s41598-022-24349-5>

- Ford, A., & Cena, C. (2023). *Mycelium Definition, Structure & Function—Lesson*. Study.com. <https://study.com/academy/lesson/what-is-mycelium-definition-function.html>
- Fungi Foundation. (2023). *Mycoremediation*. <https://www.ffungi.org/why-fungi/mycoremediation>
- Fungi turismo. (2017). *¿Qué diferencia hay entre un hongo y una seta?* Fungiturismo. <https://www.fungiturismo.com/que-diferencia-hay-entre-hongo-seta>
- Gamarra, A. (2022). *Análisis de eficiencia de la técnica biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburo mediante lodos residuales*. <https://surl.li/wygqjl>
- GeeksforGeeks. (2024). *Life Cycle of Agaricus with Diagram*. GeeksforGeeks. <https://www.geeksforgeeks.org/life-cycle-of-agaricus/>
- Gulbenkian Garden. (2021). *How do mushrooms reproduce?* Jardim Gulbenkian. <https://acortar.link/uwveTf>
- Gupta, V., Sengupta, M., Prakash, J., & Tripathy, B. (2017). An Introduction to Biotechnology. En *Basic and Applied Aspects of Biotechnology* (pp. 1-21). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0875-7_1
- HANNA Instruments. (2024). *¿Qué es el pH?* HANNA Instruments. <https://www.hannacolombia.com/blog/post/447/que-es-el-ph>
- He, H., Zhang, D., & Gao, J. (2022). Bioaccumulation and physiological changes in the fruiting body of *Agaricus bisporus* (Large) sing in response to cadmium. *Scientific Reports*, 12(1), 20079. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24561-3>

- Hidalgo, J., Epelde, L., Anza, M., Becerril, J., & Garbisu, C. (2023). Micorremediación con sustratos de crecimiento de *Agaricus bisporus* y *Pleurotus ostreatus* versus fitorremediación con *Festuca rubra* y *Brassica* sp. Para la recuperación de un suelo contaminado con Pb y γ -HCH. *Chemosphere*, 327, 138538. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138538>
- Huang, M., & Hull, C. (2017). Sporulation: How to survive on planet Earth (and beyond). *Current genetics*, 63(5), 831-838. <https://doi.org/10.1007/s00294-017-0694-7>
- Iberdrola, I. (2023). *La contaminación del suelo, sus efectos sobre nuestro futuro y qué podemos hacer para reducirla*. Iberdrola. <https://acortar.link/t0UH2p>
- Infoagronomo. (2018). *Propiedades del suelo: Físicas, químicas y biológicas*. <https://infoagronomo.net/propiedades-del-suelo-fisicas-quimicas-biologicas/>
- Infoagronomo. (2022). *Densidad aparente, que es y como se mide*. <https://infoagronomo.net/densidad-aparente-que-es-y-como-se-mide/>
- Ingenierizando. (2023). *Porosidad del suelo: Definición, fórmula, importancia,...* Ingenierizando.com. <https://www.ingenierizando.com/geotecnia/porosidad-del-suelo/>
- Jardin de Nod. (2022). Porosidad del suelo: Qué es, por qué es importante, cómo mejorarla. *El jardín de Nod*. <https://jardindenod.com/porosidad-del-suelo-que-es-por-que-es-importante-como-mejorarla/>

- Keane, C. (2024). *Soil Moisture*. Earth Science Week. <https://www.earthsciweek.org/resources/classroom-activities/soil-moisture/>
- Kumaragamage, D., Warren, J., & Spiers, G. (2022). *Química del Suelo*. LibreTexts Español. <https://acortar.link/WsMEWt>
- LibreTexts. (2016). *How Fungi Eat*. Biology LibreTexts. [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_and_General_Biology/Introductory_Biology_\(CK-12\)/08%3A_Protists_and_Fungi/8.10%3A_How_Fungi_Eat](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_and_General_Biology/Introductory_Biology_(CK-12)/08%3A_Protists_and_Fungi/8.10%3A_How_Fungi_Eat)
- LibreTexts. (2022). 5.3: *Hongos*. LibreTexts Español. <https://acortar.link/6Sd3fm>
- Madrid, M. (2021). El Suelo: Composición, Estructura, Tipos e Importancia. *Geoplaneta.net*. <https://geoplaneta.net/el-suelo-composicion-estructura-tipos-e-importancia/>
- Medium. (2018). Tipos de suelo en el césped. Cuales son apropiados. *Medium*. <https://acortar.link/7hA75W>
- MINAM. (2014). *Guía para el Muestreo de Suelos*. Biblioteca Nacional del Perú. <https://acortar.link/uGzPdm>
- Moorberg, C., & Crouse, D. (2022). *Textura y estructura del suelo*. LibreTexts Español. <https://acortar.link/mNhlyn>
- Morton, J. (2021). Fungi. En *Principles and Applications of Soil Microbiology* (pp. 149-170). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820202-9.00006-X>
- Nieto, J., Cuzcano, Á., & Reyes, W. (2019). Estudio preliminar de la composición nutricional del hongo *Pleurotus ostreatus* cultivado en

pulpa de café. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(4), 422-431. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v85i4.256>

Novobiom. (2023). *Mycoremediation*. novobiom. <https://www.novobiom.com/mycoremediation>

Núñez, W., Sotomayor, D., Ballardo, C., & Herrera, E. (2023). Potencial de la biomasa fúngica: Producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales. *Scientia Agropecuaria*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.008>

Okiemute, S., Smarte, I., Etteh, E., & Amuné, U. (2023). *La micomediación como tecnología potencialmente prometedora: Estado actual y perspectivas: Una revisión*. https://www.researchgate.net/publication/370088104_Mycoremediation_as_a_Potentially_Promising_Technology_Current_Status_and_Prospects-A_Review

Padalia, K. (2020). *Biology and diversity of viruses, bacteria and fungi*. <https://acortar.link/WegUH2>

Penn State Extension. (2023). *Introducción a los Suelos: La Calidad de los Suelos*. <https://extension.psu.edu/introduccion-a-los-suelos-la-calidad-de-los-suelos>

Perez, D. (2022). Propiedades físicas del suelo. Textura, estructura y porosidad del suelo. *Ecosistemaglobal divulgando acerca el medio ambiente*. <https://acortar.link/dbWtiw>

Redacción EC. (2022). Huánuco: Derrame de relave minero genera graves daños ambientales. *El Comercio*. <https://elcomercio.pe/peru/huanuco->

derrame-de-relave-minero-genera-graves-danos-ambientales-ambo-
video-noticia/

Refaey, M., Abdel, A., Abo, H., Abdel, M., & El, A. (2021). *Role of Fungi in Bioremediation of Soil Contaminated with Heavy Metals* (pp. 509-540).
https://doi.org/10.1007/978-3-030-67561-5_16

Riopedre, T., Delgado, A., & Cabrera, J. (2021). Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(4).
<https://www.redalyc.org/journal/1932/193270002014/>

Rodriguez, A., & Melendez, D. (2019). *Eficiencia de Lentinus edodes, Pleurotus ostreatus y Agaricus bisporus para la remediación de suelos contaminados por plomo y cadmio proveniente de La Oroya antigua, Lima-Perú, 2019*. <https://acortar.link/NjctyW>

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*.
<https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>

Sciencing. (2021). *The Life Cycle of Agaricus Bisporus*. Sciencing.
<https://sciencing.com/the-life-cycle-of-agaricus-bisporus-13427019.html>

SECS. (2018). *Técnicas biológicas de recuperación de suelos*. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo.
<https://www.secs.com.es/calendario/2018.pdf>

Sistema Solar. (2019). Permeabilidad Del Suelo: Definición, Importancia, Coeficiente Y Más. *Mi sistema solar*.
<https://misistemasolar.com/permeabilidad-del-suelo/>

- Soil Health. (2023). Electrical Conductivity. *Soil Health Nexus*.
<https://acortar.link/zmAYal>
- Sposito, G. (2024). *Suelo*. Britannica.
<https://www.britannica.com/science/soil>
- Supo, J., & Zacarías, H. (2020). *Metodología de la investigación científica: Para las ciencias de la salud y las ciencias sociales*.
<https://www.amazon.com/-/es/Dr-Jos%C3%A9-Supo/dp/B08BWFKWLB>
- Traxco. (2013). Recuperación de suelos agrícolas para mejorar la producción. *El Blog de Traxco*. <https://www.traxco.es/blog/labores-del-campo/recuperacion-suelos-agricolas>
- UNDRR. (2023). *Contaminación del suelo | UNDRR*.
<https://acortar.link/VSYH8j>
- Vaca, M., López, R., Lizardi, A., & Carmona, E. (2023). *Biorrestauración de un suelo contaminado con diésel mediante composteo con residuos de champiñón común (Agaricus bisporus) y cáscaras de plátano (Musa sp.)*. <https://hdl.handle.net/11191/10413>
- Vásquez, A. (2019). *Capacidad micorremediadora del hongo Pleurotus ostreatus en suelos contaminados con cadmio*.
<https://acortar.link/0ksysP>
- Wilkin, D., & Brainard, J. (2021). *Cómo se Alimentan los Hongos*.
<https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-conceptos-biologia/section/8.10/primary/lesson/c%C3%B3mo-se-alimentan-los-hongos/>

Wilkin, D., & Brainard, J. (2021). *Reproducción de hongos.*

<https://acortar.link/M6ebdj>

Wösten, H. (2019). *Reproducción de hongos: Descripción general.*

<https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/fungal-reproduction>

Xiong, J. (2015). *Recuperación y rehabilitación de suelos contaminados con elementos traza mediante la aplicación de enmiendas y el establecimiento de una cubierta vegetal natural o de una planta de crecimiento rápido (Paulownia fortunei).*

<https://core.ac.uk/download/pdf/51402578.pdf>

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Rivera Ventura, P. (2025). *Efecto micorremediador de la seta Agaricus bisporus sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina* - [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <http://.../>

ANEXOS

ANEXO 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA

“Efecto micorremediador de la seta *Agaricus bisporus* sobre la calidad del suelo contaminado por plomo”

Problema General	Objetivo General	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
¿Cuál es el efecto micorremediador de la seta <i>Agaricus bisporus</i> sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina?	Demostrar el efecto micorremediador de la seta <i>Agaricus bisporus</i> sobre la calidad del suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina.	H ₁ : El efecto micorremediador de la seta <i>Agaricus bisporus</i> presenta un cambio significativo sobre la calidad de suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina.	V. independiente Tratamiento por micorremediación <ul style="list-style-type: none"> • <i>Agaricus bisporus</i> Indicadores: <ul style="list-style-type: none"> • Densidad de semillas de <i>Agaricus bisporus</i> • Periodo de tratamiento • Supervivencia del hongo 	Tipo: <ul style="list-style-type: none"> • Según la intervención del investigador es con intervención. • Según el control de las mediciones es prospectivo. • Según el número de mediciones de la variable de estudio es longitudinal. • Según el número de variables analíticas es analítico.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos			
¿Cuál es el porcentaje de plomo en el suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i> ?	Describir el porcentaje de plomo del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i> .	H ₀ : El efecto micorremediador de la seta <i>Agaricus bisporus</i> no presenta un cambio significativo sobre la calidad de suelo contaminado por plomo en la localidad de Huancamina.	V. dependiente Calidad de suelo	Diseño: $Y_{ijk} = \mu + T_i + D_j + (T_i \times D_j) + \varepsilon_{ijk}$ El diseño es completamente aleatorizado de un solo factor.
¿Cuáles son las propiedades físicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i> ?	Describir las propiedades físicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i> .		Indicadores: Parámetros físicos <ul style="list-style-type: none"> • Textura Parámetros químicos <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de intercambio catiónico (CIC) • Potencial de hidrogeno (pH) • Concentración de plomo • Conductividad eléctrica (CE) 	
¿Cuáles son las propiedades químicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i> ?	Describir las propiedades químicas del suelo antes y después de la micorremediación con la seta <i>Agaricus bisporus</i> .			

ANEXO 2

ANÁLISIS DE LABORATORIO – PRE TEST

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



LASAE



ANÁLISIS DE SUELOS

1. DATOS

SOLICITANTE:	RIVERA VENTURA PATRICK ANTHONY	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE
DEPARTAMENTO:	HUÁNUCO	FECHA DE RECEPCIÓN:	14/10/24
PROVINCIA:	YAROWILCA	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	15/10/24
DISTRITO:	JACAS CHICO	FECHA DE REPORTE:	24/10/24
CASERÍO:	HUANCAMINA	RECIBO O FACTURA:	23011682
TIPO DE MUESTRA:	SUELO CONTAMINADO POR PLOMO	OBSERVACIÓN:	...

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

Nº	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO				pH	CE		CIC	Pb
			Arena	Arcilla	Limo	Clase textural		dS/m	Disponible		
			%	%	%			1:1			ppm
1	S1852	MC	62.5	16.1	21.4	Franco arenoso	5.86	0.30	9.496	43.42	
2	S1853	M1	64.6	15.3	20.1	Franco arenoso	5.75	0.24	9.814	41.11	
3	S1854	M2	60.8	16.1	23.1	Franco arenoso	5.92	0.33	9.516	44.32	
4	S1855	M3	60.5	16.7	22.8	Franco arenoso	5.98	0.45	9.482	44.40	
5	S1856	M4	63.9	16.4	19.7	Franco arenoso	5.80	0.18	9.175	43.88	

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas, queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita de LASAE. Los resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Ing. GILMER MILTON NEREA TRUJILLO
Profesor del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUÁMANI YLIPANQUI
Jefe (a) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

ANEXO 3

ANÁLISIS DE LABORATORIO – POST TEST SIN ARROZ

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



ANÁLISIS DE SUELOS

1. DATOS

SOLICITANTE:	RIVERA VENTURA PATRICK ANTHONY	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE
DEPARTAMENTO:	HUÁNUCO	FECHA DE RECEPCIÓN:	02/12/24
PROVINCIA:	YAROWILCA	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	02/12/24
DISTRITO:	JACAS CHICO	FECHA DE REPORTE:	09/12/24
CASERÍO:	HUANCAMINA	RECIBO O FACTURA:	23011912
TIPO DE MUESTRA:	SUELO CONTAMINADO POR PLOMO	OBSERVACIÓN:	...

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

Nº	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO				Clase textural	pH	CE	CIC	Pb
			Arena	Arcilla	Limo	dS/m			Disponible		
			%	%	%	1:1			ppm		
1	S2553	M1	62.8	16.3	20.9	Franco arenoso	6.35	1.30	16.256	15.62	
2	S2554	M2	64.8	17.4	17.8	Franco arenoso	6.52	1.24	15.441	16.82	
3	S2555	M3	64.6	17.1	18.3	Franco arenoso	6.48	1.21	15.345	12.44	
4	S2556	M4	62.3	16.3	21.4	Franco arenoso	6.80	1.32	17.618	13.63	

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas, queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita de LASAE.
 Los resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

 Ing. GILBERTO MILTON NEIRA TRUJILLO
 Profesor del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 Tingo María

 Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
 Jefe (e) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

ANEXO 4

ANÁLISIS DE LABORATORIO – POST TEST CON ARROZ

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



LASAE



ANÁLISIS DE SUELOS

1. DATOS

SOLICITANTE:	RIVERA VENTURA PATRICK ANTHONY	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE
DEPARTAMENTO:	HUÁNUCO	FECHA DE RECEPCIÓN:	02/12/24
PROVINCIA:	YAROWILCA	FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	02/12/24
DISTRITO:	JACAS CHICO	FECHA DE REPORTE:	09/12/24
CASERÍO:	HUANCAMINA	RECIBO O FACTURA:	23011918
TIPO DE MUESTRA:	SUELO CONTAMINADO POR PLOMO	OBSERVACIÓN:	...

2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

Nº	DATOS		ANÁLISIS MECÁNICO					pH	CE dS/m	CIC	Pb Disponibile ppm
			Arena	Arcilla	Limo	Clase textural					
			%	%	%						
1	S2557	M1	61.6	15.7	22.7	Franco arenoso	6.24	1.28	15.152	15.14	
2	S2558	M2	61.5	16.3	22.2	Franco arenoso	6.44	1.26	16.265	16.37	
3	S2559	M3	63.2	16.2	20.6	Franco arenoso	6.32	1.24	15.388	12.85	
4	S2560	M4	61.3	15.2	23.5	Franco arenoso	6.65	1.29	16.582	13.56	

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas, queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita de LASAE. Los resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Ing. GILMER MILTON NEIRA TRUELZO
Profesor del Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



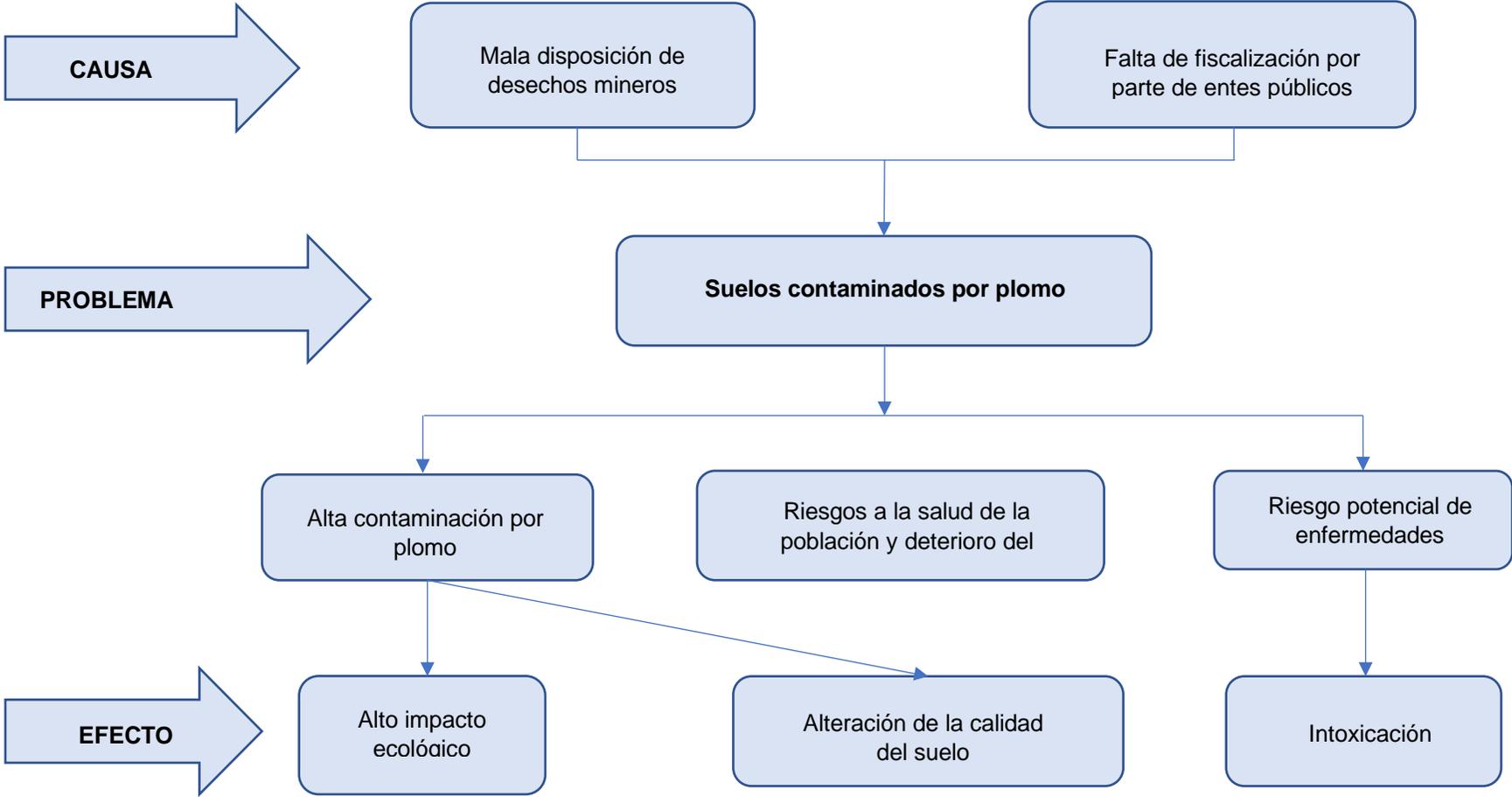
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YLPANQUI
Jefe (a) Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

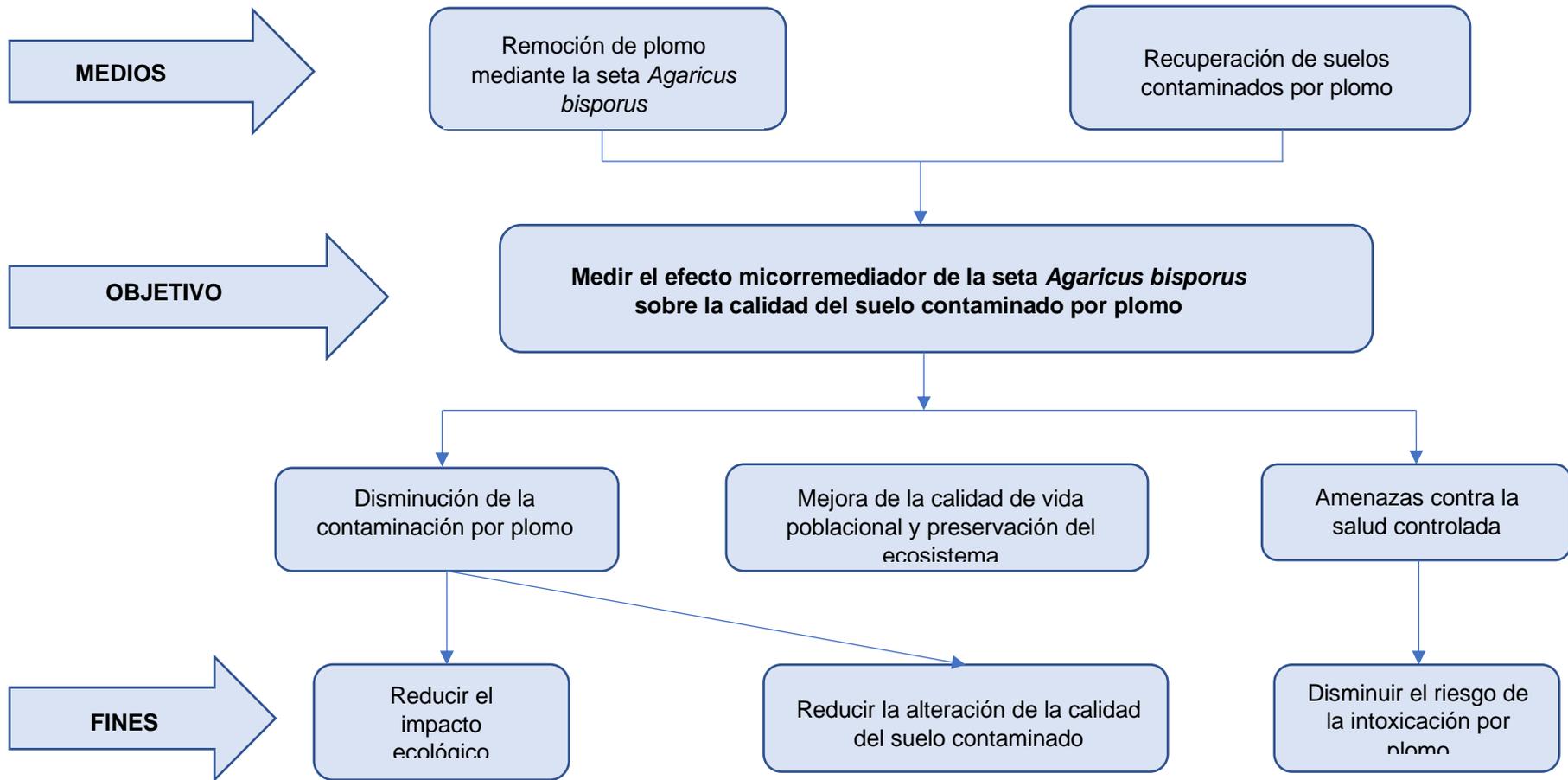
ANEXO 5
FICHA DE OBSERVACIÓN

Aspectos observados	Variable	Datos recolectados	Instrumento	Unidad de medida
Aplicación del <i>Agaricus bisporus</i>	Independiente: Tratamiento por micorremediación	M1, M2, M3, M4 (gramos de semilla)	Registro experimental / Bitácora	Código de muestra
Textura del suelo (arena, arcilla, limo)	Dependiente: Calidad del suelo	Todos los suelos clasificados como franco arenoso	Volumen de sedimentación	Clasificación textural
pH del suelo	Dependiente: Calidad del suelo	Valores entre 5.75 y 6.80 según muestra	pH-metro	Escala de pH
Conductividad eléctrica (CE)	Dependiente: Calidad del suelo	Valores entre 0.18 y 1.32 dS/m según muestra	Conductímetro	dS/m
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Dependiente: Calidad del suelo	Valores entre 9.175 y 17.618	Reacción química	meq/100g
Concentración de plomo (Pb)	Dependiente: Calidad del suelo	Valores entre 12.44 ppm (post-tratamiento) hasta 44.40 ppm (pre-tratamiento)	Espectroscopia por absorción atómica	ppm

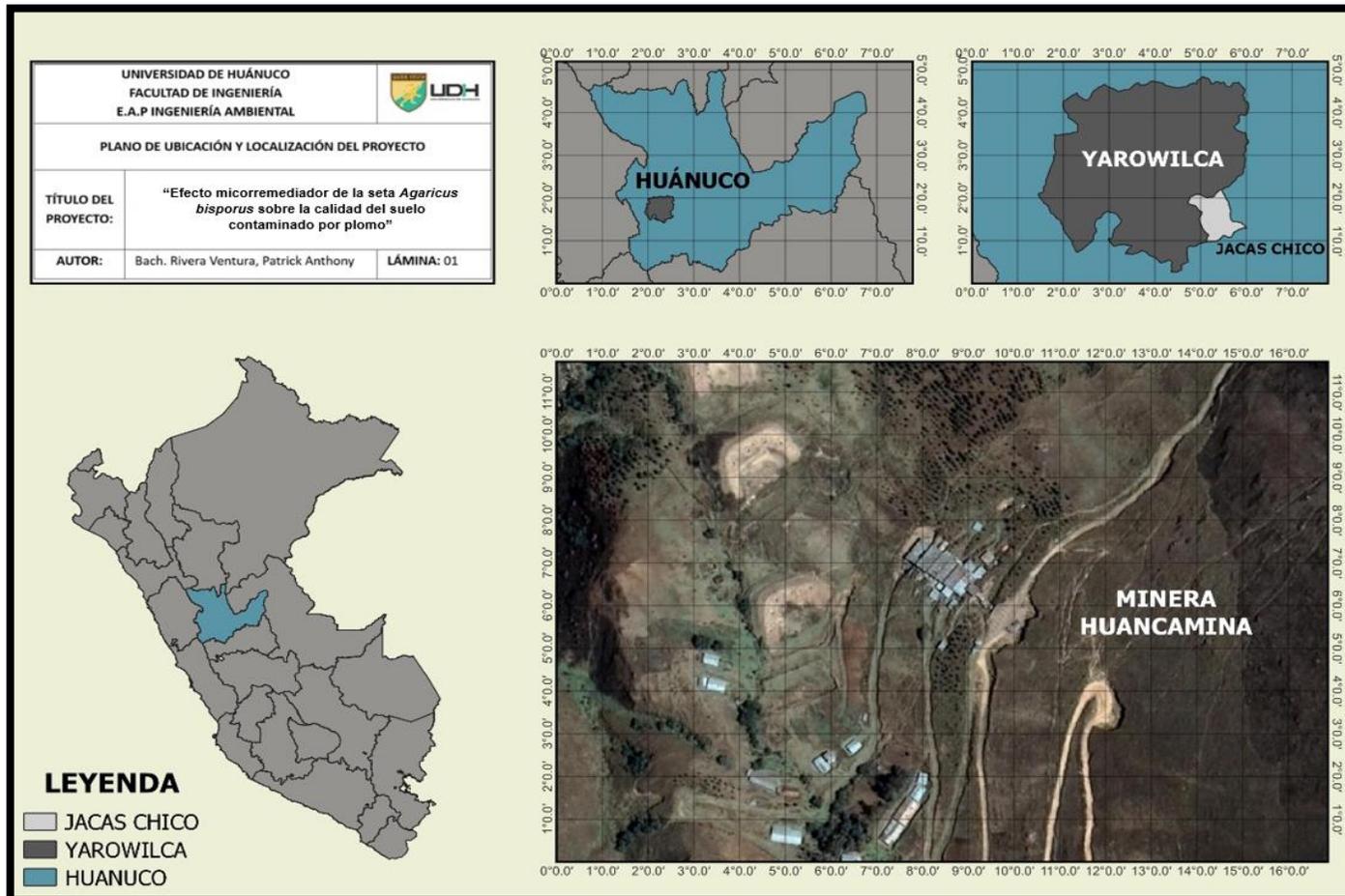
ANEXO 6
DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO



ANEXO 7
DIAGRAMA DE MEDIOS Y FINES



ANEXO 8 PLANO DE UBICACIÓN



ANEXO 8

PANEL FOTOGRÁFICO



LUGAR DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Se visualiza el lugar donde se realizó la recolección de las muestras de suelo contaminado con plomo en la localidad de Huancamina, registrando su ubicación precisa mediante las siguientes coordenadas geográficas.

COORDENADAS UTM WGS84 (18 L)		
PUNTO	NORTE	ESTE
A	8912409.920	334059.126
B	8912426.379	334079.124
C	8912383.087	334068.680
D	8912403.128	334097.986



CERCADO DE PARCELAS PARA RECOLECCIÓN DEL SUELO CONTAMINADO

En esta fase del proyecto, se delimitaron y cercaron cuatro parcelas de tres metros por tres metros cada una, asegurando una distribución adecuada para el estudio. Para llevar a cabo esta tarea, se siguieron los lineamientos establecidos en la Guía para el Muestreo de Suelos de la Plataforma del Estado Peruano, garantizando que el procedimiento cumpliera con los estándares técnicos requeridos.

El proceso de cercado se realizó utilizando materiales adecuados para evitar la alteración de las condiciones naturales del suelo y minimizar cualquier interferencia externa.



RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA A SER ANALIZADO

En esta etapa del estudio, se llevó a cabo la recolección de muestras de tierra contaminada, asegurando que el proceso se realizara de manera meticulosa y siguiendo los protocolos establecidos para evitar cualquier tipo de contaminación cruzada. Las muestras fueron extraídas de diferentes puntos estratégicos del área de estudio, con el fin de obtener una representación precisa de las condiciones del suelo.

Posteriormente, cada muestra fue etiquetada y almacenada en condiciones adecuadas para su traslado al laboratorio de la UNAS, donde se llevaron a cabo diversos análisis físicos y químicos. Estos análisis permitieron determinar la presencia del plomo, así como evaluar sus propiedades antes de aplicar el *Agaricus bisporus*.



MACETAS DE VIDRIO DONDE SE REALIZARÁ EL PROYECTO

Para esta fase del estudio, se utilizaron macetas de vidrio con dimensiones de 20 cm x 20 cm x 35 cm, seleccionadas específicamente para permitir una mejor observación del desarrollo de la red micelial del hongo a través del material transparente.

Asimismo, se realizaron cuatro agujeros en la parte inferior de cada maceta, cada uno de 1 cm de diámetro para una correcta aireación y drenaje de agua.

El uso de vidrio como contenedor presentó varias ventajas, entre ellas la posibilidad de monitorear de manera continua y sin alteraciones el crecimiento del micelio en el sustrato, así como la interacción de este con el suelo contaminado. Además, este material facilitó la toma de registros fotográficos y la evaluación de patrones de colonización en diferentes momentos del experimento.

Este enfoque permitió obtener datos más detallados sobre la capacidad de *Agaricus bisporus* para colonizar el suelo. Cabe resaltar que cada maceta se dividió en dos partes iguales separadas por una plancha de vidrio para no alterar el proceso de remediación.



SEMILLAS DE AGARICUS BISPORUS PARA SIEMBRA

En esta etapa del experimento, se llevó a cabo la observación y documentación de las semillas de *Agaricus bisporus* utilizado para la siembra en cada una de las macetas, esto con el objetivo de evaluar el impacto de diferentes concentraciones de semilla del hongo y su capacidad de colonización del sustrato, se establecen cuatro condiciones experimentales con cantidades crecientes de semilla:

- **Maceta 1:** 10 gramos de semillas
- **Maceta 2:** 20 gramos de semillas
- **Maceta 3:** 30 gramos de semillas
- **Maceta 4:** 40 gramos de semillas



MEZCLA DE LA TIERRA CON GRANOS DE ARROZ

Para optimizar el crecimiento de *Agaricus bisporus*, se realizó una modificación en la composición del suelo dentro de cada maceta. Se mezcló una parte de la tierra contaminada con granos de arroz cocido, proporcionando una fuente adicional de nutrientes que podría favorecer el desarrollo del micelio.

Es importante destacar que esta mezcla enriquecida solo se coloca en una mitad de la maceta, mientras que la otra mitad se mantiene con tierra contaminada sin ningún otro factor de ayuda. Esta distribución permitió realizar un análisis comparativo del crecimiento del hongo en ambas condiciones, observando posibles diferencias en la velocidad de expansión del micelio, la densidad de la red fúngica y su capacidad de colonización del sustrato.



LLENADO DE LAS MACETAS DE VIDRIO CON LAS MUESTRAS DE TIERRA CONTAMINADA

En esta fase del experimento, se llevó a cabo el llenado de las macetas de vidrio con las muestras de tierra contaminada, asegurando una distribución uniforme del sustrato dentro de cada recipiente. Este proceso fue documentado desde su inicio para registrar las condiciones iniciales del suelo antes de la inoculación con *Agaricus bisporus*.

Cada maceta fue llenada cuidadosamente, respetando los volúmenes definidos y evitando la compactación excesiva del suelo, lo que permitió mantener una adecuada aireación para el desarrollo del micelio. Asimismo, se aseguraron condiciones homogéneas entre todas las macetas, garantizando que cualquier diferencia en el crecimiento del hongo pudiera atribuirse a las variables experimentales y no a factores externos.



PLANTADO DE SEMILLAS DE *Agaricus bisporus*

En esta fase del experimento, se llevó a cabo el sembrado de semillas de *Agaricus bisporus* en las macetas de vidrio, asegurando condiciones óptimas para el desarrollo del micelio. Durante este proceso, se mantuvo una temperatura promedio de 20 °C, un rango adecuado para la germinación y crecimiento del hongo.

Cada maceta fue llenada con 10,5 kilogramos de tierra contaminada, distribuida equitativamente en dos secciones de 5,25 kilogramos cada una: una mitad con tierra contaminada mezclada con granos de arroz cocido y la otra mitad con tierra contaminada sin ningún tipo de ayuda.

Para garantizar un ambiente favorable para el micelio, se mantiene la humedad del sustrato en todo momento. Como parte del procedimiento, se agregaron 750 mililitros de agua a cada maceta, permitiendo que la tierra alcance el nivel de humedad necesario sin llegar a la saturación.



SELLADO DE MACETAS CON FILM PLÁSTICO

Para garantizar condiciones óptimas para el crecimiento del micelio, se realizó el sellado de las macetas con film plástico, con el objetivo de conservar la humedad y evitar la evaporación excesiva del agua, reduciendo así la necesidad de riego frecuente.

Además de mantener la humedad, la película plástica actuó como una barrera protectora, impidiendo la entrada de contaminantes externos que podrían afectar el desarrollo del *Agaricus bisporus*. Sin embargo, para asegurar una adecuada oxigenación del sustrato, se perforaron varios huecos en la película, permitiendo el crecimiento del hongo.



APARICIÓN DE MICELIO DEL *AGARICUS BISPORUS*

A los 12 días de haber sembrado las semillas de *Agaricus bisporus*, se visualizó la aparición del micelio en las macetas, marcando el inicio de la colonización del sustrato por parte del hongo.

El micelio comenzó a expandirse desde los puntos donde se sembraron las semillas, que se fue extendiendo progresivamente a través de la tierra contaminada. La presencia de este crecimiento fúngico indicó que las condiciones de temperatura (20 °C), humedad y aireación habían sido adecuadas para el desarrollo del hongo.

Se observaron diferencias en la velocidad de expansión del micelio entre las dos secciones de cada maceta: la mitad con tierra contaminada mezclada con granos de arroz cocido mostró un crecimiento más denso y rápido en comparación con la mitad sin suplemento nutricional. Esto sugirió que la adición de arroz cocido había proporcionado un beneficio adicional para la proliferación del hongo.



APARICIÓN DEL CUERPO FRUCTÍFERO DEL *Agaricus bisporus*

A los 18 días de haber sembrado las semillas de *Agaricus bisporus*, se visualizó la aparición del cuerpo fructífero en las macetas, marcando una nueva fase en el desarrollo del hongo.

Los primordios comenzaron a emerger sobre la superficie del sustrato, mostrando pequeñas estructuras esféricas que, con el paso de los días, fueron aumentando de tamaño hasta formar los cuerpos fructíferos característicos del hongo. Este proceso indicó que el micelio había logrado una colonización exitosa del sustrato y que las condiciones ambientales, como la temperatura controlada de 20 °C y la humedad conservada mediante el sellado con film plástico, habían sido favorables para su crecimiento.

Se comprobará que la densidad y el tamaño de los cuerpos fructíferos variarán entre las dos secciones de las macetas. En la mitad donde se había incorporado granos de arroz cocido, el desarrollo de los hongos fue más vigoroso, sugiriendo que la suplementación con nutrientes adicionales había influido positivamente en su formación.



MUESTRAS ROTULADAS PARA ENVIÓ AL LABORATORIO

Se observan las muestras rotuladas que fueron enviadas al laboratorio para su respectivo análisis. En total, se enviaron 13 muestras, distribuidas en dos etapas del estudio: 5 muestras correspondientes al pre-test y 8 muestras al pos-test.

Cada muestra tenía un peso de 1 kilogramo y fue empacada en bolsas de polietileno con cierre deslizante, lo que garantizó su adecuada conservación y minimizó el riesgo de contaminación durante el transporte. Todas las bolsas fueron debidamente rotuladas con la información necesaria, incluyendo la identificación del tratamiento, la fecha de recolección y el código correspondiente para su trazabilidad en el laboratorio.

El envío de estas muestras permitió realizar un análisis comparativo entre las condiciones iniciales del suelo antes de la inoculación con *Agaricus bisporus* (pre-test) y los cambios observados después del crecimiento del hongo (pos-test). Los resultados obtenidos en el laboratorio fueron fundamentales para evaluar la efectividad del hongo en la biorremediación del suelo contaminado.