



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**AMBIENTAL Y FORESTAL**



**“BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD  
MEDIANTE EL EMPLEO DEL *Aspergillus* sp. AISLADA DE LA  
CELDA TRANSITORIA DE HUANUYO”**

**Bach. Evelin Sharmeli Lope Ccari**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

**Asesor:  
M. Sc. Hugo Apaza Aquino**



**JULIACA, PERÚ**

**2024**





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
Y FORESTAL**



**“BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD  
MEDIANTE EL EMPLEO DEL *Aspergillus sp.* AISLADA DE LA  
CELDA TRANSITORIA DE HUANUYO”**

**Bach. Evelin Sharmeli Lope Ccari**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

**Asesor:  
M. Sc. Hugo Apaza Aquino**



**JULIACA, 2024**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL**



**“BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD  
MEDIANTE EL EMPLEO DEL *Aspergillus sp.* AISLADA DE LA  
CELDA TRANSITORIA DE HUANUYO”**

Bach. Evelin Sharmeli Lope Ccari

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Asesor:

M. Sc. Hugo Apaza Aquino

Juliaca, 2024

Lope, E. S. (2024). *Biodegradación de polietileno de baja densidad mediante el empleo del *Aspergillus sp.* aislada de la celda transitoria de Huanuyo*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca. Juliaca.

**AUTOR:** Evelin Sharmeli Lope Ccari

**TÍTULO:** Biodegradación de polietileno de baja densidad mediante el empleo del *Aspergillus sp.* aislada de la celda transitoria de Huanuyo.

**PUBLICACIÓN:** Juliaca, 2024

**DESCRIPCIÓN:** Cantidad de páginas (132)

**CÓDIGO:** 01-000043-01/L86

**NOTA:** Tesis Escuela profesional de ingeniería Ambiental y Forestal

**ASESOR:** M. Sc. Hugo Apaza Aquino

**PALABRAS CLAVE:** *Aspergillus sp.*, biodegradación, microcultivo, celda transitoria, polietileno de baja densidad.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL**

**“BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD MEDIANTE EL  
EMPLEO DEL *Aspergillus sp.* AISLADA DE LA CELDA TRANSITORIA DE  
HUANUYO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Presentado por:

**Bach. Evelin Sharmeli Lope Ccari**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras

**PRESIDENTE**



M.Sc. Godofredo Huanca Chambi

**JURADO (Secretario)**



**2° MIEMBRO**

M.Sc. Roxana Milagros Escarcena Flores

**JURADO (Vocal)**



**3° MIEMBRO**



**ASESOR(A) DE TESIS**

M. Sc. Hugo Apaza Aquino

NOMBRE DEL TRABAJO

**BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO DE  
BAJA DENSIDAD MEDIANTE EL EMPLE  
O DEL Aspergillus sp. AISLADA DE LA**

AUTOR

**Evelin Sharmeli Lope Ccari**

RECUENTO DE PALABRAS

**30573 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**158758 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**132 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**5.6MB**

FECHA DE ENTREGA

**Nov 8, 2024 11:34 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Nov 8, 2024 11:35 AM GMT-5**

● **7% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 6% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

## **DEDICATORIA**

*A Dios por cuidar a mis seres queridos en especial por nunca  
hacerme faltar nada y por darme las fuerzas necesarias.*

*A mi mamá Casimira Hanco Parahuayo por haber estado y estar  
siempre a mi lado desde el principio, así como durante todo el  
proceso de mi formación profesional, por la confianza que deposita  
en mí y por brindarme su apoyo incondicional en todo momento.*

*A mi papá David Lope Hanco por su optimismo, apoyo y motivación  
para seguir adelante.*

*A mi abuelo Francisco Lope Condori por su preocupación y sus  
consejos.*

*A Leodan por apoyar en la etapa de ejecución del proyecto.*

## **AGRADECIMIENTO**

*A Dios por las bendiciones infinitas y por las fuerzas que me manda para salir adelante, agradecer porque estoy con vida y rodeada de mis seres queridos, agradecida por cuidar a mis padres.*

*Agradezco a la Universidad Nacional de Juliaca y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal, por haber sido el ente y contribuir mi formación profesional.*

*Agradezco al M. Sc. Hugo Apaza Aquino por compartir sus conocimientos, tiempo y sus consejos, por dejarme la lección del lapicero, por brindar el apoyo en la elaboración del proyecto de investigación.*

*Agradezco a los miembros del jurado a la M.Sc. Eliana Mullisaca Contreras, al M.Sc. Godofredo Huanca Chambi asimismo a la M.Sc. Roxana Milagros Escarcena Flores, por aportar sus conocimientos y experiencia.*

*Agradezco a todas las personas por sus palabras alentadoras para concluir el proyecto de investigación.*

*Así también agradezco al MV Dr Eliana, al Blgo Howard por el apoyo incondicional en los laboratorios.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.1. Situación problemática.....	5
1.2. Formulación del problema.....	7
1.2.1. Problema general.....	7
1.2.2. Problemas específicos.....	7
1.3. Objetivos de la investigación.....	7
1.3.1. Objetivo general.....	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4. Hipótesis de la investigación.....	7
1.4.1. Hipótesis general.....	7
1.4.2. Hipótesis específicas.....	7
1.5. Justificación de la investigación.....	8
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1. Antecedentes de la investigación.....	10
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	10
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	12
2.1.3. Antecedentes locales.....	14

2.2.	Bases teóricas.....	15
2.2.1.	Plásticos .....	15
2.2.2.	Polímeros .....	15
2.2.3.	Polietileno.....	18
2.2.4.	Polietileno de baja densidad .....	20
2.2.5.	Contaminación por plásticos .....	23
2.2.6.	Residuos sólidos .....	23
2.2.7.	Tecnologías de tratamiento de residuos plásticos.....	24
2.2.8.	Tratamientos mecánicos .....	25
2.2.9.	Biodegradación microbiana.....	26
2.2.10.	Biodegradación de polímeros mediante hongos filamentosos .....	33
2.2.11.	Género de hongos con capacidad biodegradadora de polietileno.....	33
2.2.12.	Aspergillus sp. ....	34
2.2.13.	Celda transitoria de Huanuyo .....	43
2.2.14.	Normativa ambiental .....	44
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS.....		45
3.1.	Ámbito de estudio.....	45
3.2.	Equipos, materiales, reactivos e insumos .....	46
3.2.1.	Equipos .....	46
3.2.2.	Materiales .....	46
3.2.3.	Reactivos .....	46
3.2.4.	Insumos.....	46
3.3.	Población y tamaño de muestra .....	46
3.3.1.	Población .....	46
3.3.2.	Tamaño de muestra.....	47
3.3.3.	Tipo de investigación .....	47
3.3.4.	Diseño de investigación.....	47

3.4.	Metodología de la investigación .....	49
3.4.1.	Aislamiento y caracterización del hongo <i>Aspergillus sp.</i> procedentes de la celda transitoria de Huanuyo de la ciudad de Juliaca.....	49
3.4.2.	Realización de ensayos de biodegradabilidad de polietileno de baja densidad empleando <i>Aspergillus sp.</i> .....	51
3.4.3.	Análisis estadístico .....	54
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		56
4.1.	Aislamiento y caracterización de la cepa <i>Aspergillus sp.</i> de la celda transitoria de Huanuyo.....	56
4.1.1.	Caracterización macroscópica .....	56
4.1.2.	Caracterización microscópica.....	57
4.2.	Resultados de los ensayos de biodegradabilidad de polietileno de baja densidad empleando <i>Aspergillus sp.</i> .....	60
4.2.1.	Análisis de los resultados de los ensayos de biodegradación .....	61
4.2.2.	Análisis microscópico del polietileno de baja densidad .....	64
4.2.3.	Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.....	65
4.2.4.	Análisis estadístico de la investigación .....	67
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		73
5.1.	Conclusiones.....	73
5.2.	Recomendaciones .....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		75
ANEXOS .....		85

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los polímeros .....	16
Tabla 2. Clasificación de los polímeros .....	17
Tabla 3. Clasificación de polietileno para el reciclaje.....	20
Tabla 4. Características y propiedades del polietileno de baja densidad.....	22
Tabla 5. Características macromorfológicas y micromorfológicas de hongos del género <i>Aspergillus sp.</i> .....	41
Tabla 6. Absorciones IR características de algunos grupos funcionales.....	43
Tabla 7. Ubicación de la celda transitoria de Huanuyo .....	45
Tabla 8. Descripción de los factores y niveles .....	47
Tabla 9. Decodificación de los factores y niveles .....	47
Tabla 10. Diseño experimental con cuatro factores y tres niveles .....	48
Tabla 11. Diseño de análisis de varianza ANOVA .....	49
Tabla 12. Puntos de muestreo de la celda transitoria .....	50
Tabla 13. Resultados del % de biodegradación del PEBD empleando el <i>Aspergillus sp.</i> ..	60
Tabla 14. Resultados del análisis de varianza ANOVA.....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Polimerización del polietileno (PE). .....	18
Figura 2. Estructura molecular del polietileno de baja densidad.....	21
Figura 3. Observación microscópica del <i>Aspergillus sp.</i> .....	34
Figura 4. Etapas involucradas en el proceso de biodegradación realizada por hongos del género <i>Aspergillus</i> .....	37
Figura 5. Principales estructuras morfológicas del género <i>Aspergillus</i> . .....	40
Figura 6. Celda transitoria de Huanuyo.....	44
Figura 7. Mapa de ubicación de la celda transitoria de Huanuyo.....	45
Figura 8. Observación macroscópica de cultivos en placas del <i>Aspergillus sp.</i> .....	57
Figura 9. Observación microscópica a 100x del <i>Aspergillus sp.</i> .....	57
Figura 10. Observación macroscópica y microscópica del cultivo de <i>Aspergillus niger</i> en agar Sabouraud del atlas. ....	58
Figura 11. Observación microscópica del polietileno de baja densidad .....	64
Figura 12. Espectro infrarrojo de las láminas de polietileno de baja densidad sin tratamiento. ....	65
Figura 13. Espectro infrarrojo de las láminas de polietileno de baja densidad con tratamiento de biodegradación. ....	66
Figura 14. Comparación de los espectros de las láminas de polietileno de baja densidad con tratamiento y sin tratamiento. ....	66
Figura 15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados .....	69
Figura 16. Gráfica de probabilidad normal .....	70
Figura 17. Gráfica de residuos vs. ajustes .....	70
Figura 18. Gráfica de Residuo vs. Orden .....	71
Figura 19. Gráfica de efectos principales para Y= % de biodegradación .....	71
Figura 20. Gráfica de interacción para Y = % de biodegradación .....	72

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia .....	85
Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables.....	86
Anexo 3. Resultados de ensayos de biodegradación del PEBD en 30 días.....	87
Anexo 4. Resultados de ensayos de biodegradación del PEBD en 60 días.....	90
Anexo 5. Resultados de ensayos de biodegradación en 90 días .....	93
Anexo 6. Tablas de resultados de la decodificación de los factores.....	96
Anexo 7. Informe del ensayo Análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier .....	102
Anexo 8. Panel fotográfico de la etapa de campo .....	110
Anexo 9. Panel fotográfico de la etapa de laboratorio .....	112

## RESUMEN

El plástico es un material indispensable para la actividad cotidiana, el 9.68% de los residuos domiciliarios de la ciudad de Juliaca está compuesto por plástico, los cuales impactan en el ambiente debido a su degradación lenta. La investigación evaluó la capacidad de biodegradación del polietileno de baja densidad (PEBD) mediante el empleo del *Aspergillus sp.* aislada de la celda transitoria de Huanuyo. Se aislaron muestras con indicios de podredumbre, cultivando en el agar dextrosa de Sabouraud a 37 °C por 48 horas y para la identificación del *Aspergillus sp.* se realizó en base a las características macroscópicas y la observación microscópica empleando la técnica del microcultivo, para los ensayos de biodegradación se emplearon matraces de 250 mL, donde se incorporaron láminas PEBD e inocularon cepas de *Aspergillus sp.*, sometidos a variables tiempo (30, 60 y 90 días); temperatura (20, 27 y 37 °C); pH (5, 6 y 7) y volumen del agar (50, 75 y 100 mL), para determinar la capacidad de la biodegradación se empleó la pérdida de peso de las láminas PEBD, análisis microscópica de las láminas de PEBD y el análisis de los grupos funcionales (FTIR) en un rango de 650  $\text{cm}^{-1}$ - 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Como resultado máximo se alcanzó el 12.87% de biodegradación a 37 °C, 90 días, con pH de 6 y un volumen de 100 mL del medio de cultivo, en el análisis microscópico se observaron fisuras sobre la superficie de las láminas, asimismo en el análisis de espectroscopia se evidencio diferentes grupos funcionales de la lámina expuesta al tratamiento respecto al blanco, además el análisis estadístico sustenta la existencia de interacción de los factores independientes con respecto al factor dependiente (porcentaje de biodegradación).

**Palabras clave:** *Aspergillus sp.*, biodegradación, celda transitoria, microcultivo, polietileno de baja densidad.

## ABSTRACT

Plastic is an indispensable material for daily activities; 9.68% of household waste in the city of Juliaca is composed of plastic, which impacts the environment due to its slow degradation. The research evaluated the biodegradation capacity of low density polyethylene (LDPE) using *Aspergillus* sp. isolated from the Huanuyo transient cell. Samples with signs of rotting were isolated, cultured on Sabouraud's dextrose agar at 37 °C for 48 hours and for the identification of *Aspergillus* sp. was carried out based on macroscopic characteristics and microscopic observation using the microculture technique, for the biodegradation tests 250 mL flasks were used, where LDPE sheets were incorporated and inoculated with *Aspergillus* sp, The flasks were subjected to time (30, 60 and 90 days); temperature (20, 27 and 37 °C); pH (5, 6 and 7) and agar volume (50, 75 and 100 mL). To determine the biodegradation capacity, the weight loss of the LDPE sheets, microscopic analysis of the LDPE sheets and analysis of the functional groups (FTIR) in a range of 650 cm<sup>-1</sup> - 4000 cm<sup>-1</sup> were used to determine the biodegradation capacity. The maximum result was 12.87% biodegradation at 37 °C, 90 days, pH 6 and a volume of 100 mL of culture medium. The results of the microscopic analysis showed fissures and cracks on the surface of the films, the spectroscopic analysis showed different functional groups of the film exposed to the treatment with respect to the target, and the statistical analysis supports the existence of interaction of the independent factors with respect to the dependent factor (percentage of biodegradation).

**Keywords:** *Aspergillus* sp., biodegradation, transient cell, microculture, low density polyethylene.

## INTRODUCCIÓN

El plástico está formado por una variedad de moléculas de polímero con largas cadenas sintéticas (Nasrabadi et al., 2023), durante el último medio siglo la producción del plástico creció desmedidamente por el uso en las actividades cotidianas (Sanchez-Hernandez, 2021), sustituyendo materiales tradicionales como la madera, el metal y el vidrio, por características del plástico como; bajo costo de fabricación, durabilidad, alta resistencia (Yao et al., 2022), ligereza, asequibilidad (Nasrabadi et al., 2023) y versatilidad que permite su adopción en diversas aplicaciones (Plastics Europe, 2021); en el año 2019 se reportó una producción de 370 millones de toneladas a nivel global (Plastics Europe, 2020), asimismo en el 2022 aumentó a 390.7 millones de toneladas (Mészáros et al., 2023).

En 2021, China fue responsable de un tercio de la producción con el 32%, seguida de América del Norte con el 18%, Asia con el 17%, Europa con el 15%, África y Oriente Medio con el 8% (Mészáros et al., 2023), por otro los plásticos más utilizados son el tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP), el polietileno (PE), polietileno de baja densidad (PEBD), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS), poliuretano (PU) y tereftalato de polibutileno (PBT) (Bautista-Zamudio et al., 2023; Yao et al., 2022). En efecto el problema radica en la etapa de eliminación o disposición final de los residuos plásticos (Fin de Vida) (Williams & Rangel-Buitrago, 2022), debido a que el plástico se convierte en residuo después del uso se liberan al ambiente (Mészáros et al., 2023), los métodos de eliminación según Bautista-Zamudio et al. (2023) el 65% son depositados en vertederos, 25% se incineran y 10% se reciclan, por otro lado Nasrabadi et al. (2023) indica que la mitad se acumula en los vertederos y la otra mitad en el ambiente.

Según el informe publicado recientemente por las Naciones Unidas, anualmente se desechan al ambiente aproximadamente 400 millones de toneladas de residuos plásticos, generando una acumulación en el ambiente (Nasrabadi et al., 2023; Sangiorgio et al., 2021; Yao et al., 2022), por el lento proceso de degradación (Carrillo et al., 2018; Mészáros et al., 2023; Yao et al., 2022), la acumulación provoca impactos en los ecosistemas (Wu & Criddle, 2021), amenaza ríos, costas y océanos, en el ser humano, impacta el turismo y la recreación, otro problema de la acumulación de plásticos en el ambiente es la formación de partículas llamadas microplásticos (MP) (Williams & Rangel-Buitrago, 2022)

Así mismo durante la producción del plástico se añaden ciertos químicos y aditivos, estas sustancias son altamente tóxicas, los contaminantes peligrosos como los metales pesados pueden adherirse a materiales plásticos, a última instancia, pueden llegar a la cadena trófica y causar daños a las glándulas endocrinas, trastornos del sistema digestivo, estrés patológico, reducción de la tasa de crecimiento y problemas de reproducción de los órganos vivos que representan una amenaza para los seres humanos, organismos terrestres y marinos (Nasrabadi et al., 2023). Las estrategias de gestión de los residuos plásticos como la pirólisis y reciclaje no son suficientes para aligerar la entrada continua y elevada de plástico al ambiente (Dilkes-Hoffman et al., 2019), frente a ello existen alternativas como la biodegradación (Uribe et al., 2010), la cual tiene un enfoque respetuoso y sostenible con el ambiente respecto al manejo de la acumulación de estos residuos plásticos (Thew et al., 2023; Yao et al., 2022).

La biodegradación consiste en la transformación química de polímeros en unidades más pequeñas por parte de microorganismos (Nasrabadi et al., 2023), produciendo efectos como erosión, agrietamiento y decoloración de las láminas de PEBD (Bautista-Zamudio et al., 2023), se han identificado varios microorganismos como hongos y bacterias, para el estudio se aisló el *Aspergillus sp.* un hongo filamentoso conocido por su adaptabilidad y un descomponedor destacado (Nasrabadi et al., 2023), algunas de estas especies como *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* y *Aspergillus oryzae*, se emplean para la biodegradación del PEBD, la biodegradación del material ha surgido debido a su gran demanda y uso generalizado, se utiliza en diferentes industrias por sus propiedades como durabilidad, rentabilidad, peso ligero y eficiencia energética, una vez eliminado el PEBD, se vierten en vertederos y entornos naturales, lo que genera una variedad de problemas por su lenta descomposición (DSouza et al., 2021).

En el 2023 se generó 955.44 toneladas de PEBD en la ciudad de Juliaca (SIGERSOL, 2024), por las diversas actividades comerciales, el 12.44% son plásticos de un solo uso (Huamaní et al., 2020), por tanto, la presente investigación tiene como objetivo general evaluar la capacidad de biodegradación de polietileno de baja densidad mediante el empleo del *Aspergillus sp.* aislada de la celda transitoria de Huanuyo, siendo una alternativa de gestión de desechos plásticos.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Situación problemática

En el último siglo, la producción del plástico se ha venido incrementando por la demanda de este material para diferentes aplicaciones (Carrillo et al., 2018; Zambrano, 2018), en el 2022 la producción de plásticos fue de 390.7 millones de toneladas a nivel mundial, teniendo una proyección de 1231 millones de toneladas para el 2060 (Mészáros et al., 2023), porque la tasa de producción anual es de 5% (Nasrabadi et al., 2023), anualmente se desechan al ambiente 400 millones de toneladas de residuos plásticos, por consiguiente se acumulan en el ambiente y en reservas marinas (Nasrabadi et al., 2023; Sangiorgio et al., 2021; Yao et al., 2022).

Según la producción per cápita de residuos sólidos en Latinoamérica, el Perú alcanza un promedio de 0.75 kg al día (Lara, 2022), generando 5 533 582.7 toneladas de residuos domiciliarios en el año 2020 (INEI, 2021), del total de los residuos solo el 10.7% son residuos plásticos, del cual el 58% son de un solo uso y el 35% de los residuos plásticos no tienen una disposición adecuada (MINAM, 2021), depositándose en botaderos, rellenos sanitarios y en reservas marinas, causando deterioro de la calidad ambiental y representando un peligro físico para la vida silvestre debido a que se pueden enredar en ellos o ingerirlos (Gómez, 2021), afectando a diversas especies como aves, leones marinos, tortugas, peces y crustáceos, como fueron hallados sin signos vitales en la costa peruana a 400 km de Lima (Espinoza, 2018).

En la ciudad de Puno se producen 110 t de residuos sólidos, el 19% son de residuos plásticos y 7% del total son PEBD (Butron, 2020). En la ciudad de Juliaca se genera 192.14 toneladas al día de residuos sólidos, de los cuales 9.68% son residuos plásticos (Paredes, 2023), en el 2023 se generó 955.44 toneladas de PEBD (SIGERSOL, 2024), a causa del crecimiento demográfico (Huamaní, 2017), también por el proceso de comercialización, fabricación, transformación de bienes y servicios (Churquipa, 2018), además no se tiene el hábito de reciclar, por el contrario se tiene una cultura de usar y tirar (Paucar & Argote, 2018), el PEBD es un material resistente a la degradación natural, generando una acumulación en los ecosistemas, botaderos y calles (puntos críticos), trayendo consecuencias como deterioro del paisaje,

proliferación de enfermedades (malos olores, lixiviados, presencia de insectos y roedores), que afectan a los seres humanos y animales (Huamaní, 2017).

La celda transitoria de Huanuyo acoge los residuos sólidos del distrito de Juliaca, las cuales son cubiertas y compactadas por maquinaria pesada (Municipalidad Provincial de San Román, 2020), pero es importante implementar una gestión de los residuos plásticos con el fin de reducir gastos en la disposición final, el problema de la investigación es la falta de tratamiento de PEBD antes de la disposición final. Por consiguiente la biodegradación microbiana es una alternativa para acelerar el tiempo de degradación del PEBD (Mostajo & Ambur, 2022), que consiste en la transformación química de polímeros en unidades más pequeñas (Nasrabadi et al., 2023), causando erosión, agrietamiento y decoloración (Bautista-Zamudio et al., 2023).

El *Aspergillus sp.* es un hongo filamentoso conocido por su adaptabilidad y capacidad de degradación de materia orgánica, además produce enzimas extracelulares que intervienen en la biodegradación de polímeros (Nasrabadi et al., 2023), las enzimas inician el proceso de biodegradación fragmentando las moléculas del PEBD, por consiguiente las actividades metabólicas pueden provocar cambios bioquímicos, además la oxidación abiótica de la cadena polimérica conducen a la formación de los grupos funcionales y carbonilos a raíz del proceso se forman grupos carboxílicos, que sufren posteriormente  $\beta$ -oxidación y se degradan completamente a través del ciclo del ácido cítrico que resulta en la formación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Nasrabadi et al., 2023; Yepes, 2014).

Por ende, el objetivo del proyecto de investigación fue evaluar la capacidad de biodegradación de polietileno de baja densidad mediante el empleo del *Aspergillus sp.* aislada de la celda transitoria de Huanuyo, la cual pretende dar respuesta a la creciente problemática de los residuos plásticos, proponiendo una solución basada en la biodegradación.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál será la capacidad de biodegradación del polietileno de baja densidad mediante el empleo del *Aspergillus sp.* aislada de la celda transitoria de Huanuyo?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Se podrá aislar y caracterizar el *Aspergillus sp.* de la celda transitoria de Huanuyo?
- ¿Cuál será la eficiencia de biodegradabilidad de polietileno de baja densidad empleando el *Aspergillus sp.*?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar la *capacidad* de biodegradación de polietileno de baja densidad mediante el empleo del *Aspergillus sp.* aislada de la celda transitoria de Huanuyo.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Aislar y caracterizar la cepa de *Aspergillus sp.* de la celda transitoria de Huanuyo.
- Realizar ensayos de biodegradabilidad de polietileno de baja densidad empleando *Aspergillus sp.*

## **1.4. Hipótesis de la investigación**

### **1.4.1. Hipótesis general**

La cepa de *Aspergillus sp.* aislada de la celda transitoria de Huanuyo tiene la capacidad para biodegradar polietileno de baja densidad.

### **1.4.2. Hipótesis específicas**

- Dado que en la celda transitoria de Huanuyo se tiene residuos orgánicos, es probable que se pueda aislar la cepa de *Aspergillus sp.*
- El *Aspergillus sp.* reduce el peso de la muestra en los ensayos de biodegradabilidad del polietileno de baja densidad.

## 1.5. Justificación de la investigación

En el ámbito ambiental, los plásticos de un solo uso (PEBD), son materiales que se producen en grandes cantidades, acumulándose en el ambiente debido a que son resistentes a la corrosión y degradación natural (Erazo, 2018), demorando alrededor de 50 a 300 años (Zambrano, 2018), los cuales son un riesgo para el ambiente, afectando la biodiversidad y la calidad ambiental (Cedeño & Merino, 2020). La biodegradación por microorganismos es una alternativa viable y sostenible con el ambiente para gestionar el PEBD, en este estudio se evaluó el potencial del *Aspergillus sp.* para minimizar el impacto ambiental del PEBD cuyos resultados aportaran nuevos conocimientos (Andia & Perez, 2020; Choquehuanca & Sandoval, 2023), la cual tiene un enfoque sostenible con el ambiente respecto al manejo de la acumulación de estos residuos plásticos (Thew et al., 2023; Yao et al., 2022).

En el ámbito social, la acumulación de residuos plásticos en espacios urbanos y rurales afecta a la población (Choquehuanca & Sandoval, 2023), con el tiempo los plásticos se fragmentan en películas que liberan ftalato posteriormente son absorbidos por vegetales, al mismo tiempo estas películas pueden acumular pesticidas y toxinas que se usan en la agricultura, llegando a la cadena alimenticia, generando un riesgo a la salud de la población y a los animales de pastoreo (Andia & Perez, 2020), por consiguiente se pretende dar una solución al problema, biodegradando el PEBD mediante el *Aspergillus sp.* (Choquehuanca & Sandoval, 2023).

En el ámbito económico, se optó por la biodegradación dado que diferentes autores como Andia y Perez (2020) indican que es un método rentable, sostenible y de bajo costo, debido a que el hongo *Aspergillus sp.* es una especie que crecen en diferentes lugares con presencia de restos de plantas en podredumbre. La biodegradación mediante el *Aspergillus sp.* permiten reducir pérdidas económicas en la recuperación de áreas afectadas por el PEBD, así como de las zonas de influencia de los rellenos sanitarios y celdas transitorias, dado que se aprovecha un hongo descomponedor de materia orgánica sin costo alguno (Choquehuanca & Sandoval, 2023), por ende la investigación de biodegradación del PEBD mediante el hongo *Aspergillus sp.*, fue un método sostenible con un costo relativamente elevado con relación a la eficiencia de biodegradación.

En el ámbito técnico, frente a la problemática de los residuos plásticos, existen tecnologías (Pirolisis, hidrogenación, gasificación, metanólisis) y biotecnologías (Uribe et al., 2010) como la biodegradación por microorganismos, que suele ser más eficiente y viable que otras alternativas (Herrera & Ospina, 2019), según Nasrabadi et al. (2023) el *Aspergillus sp.* tiene la capacidad de descomponer PEBD por medio de la secreción de enzimas e hidrofobinas que son proteínas fúngicas que pueden aumentar la capacidad de biodegradación, algunas de las enzimas como: las amilasas, lipasas y ácido ascórbico, que desintegran los enlaces químicos de las moléculas del PEBD (Andia & Perez, 2020), causando cambios en sus propiedades bioquímicas, considerándolas como fuente de carbono (Gonzales, 2019), por tal motivo se planteó realizar ensayos de biodegradación de PEBD empleando el hongo *Aspergillus sp.* sometidos a diferentes factores (temperatura, tiempo, pH, volumen del medio de cultivo).

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

DSouza et al. (2021), en su informe titulado “Biodegradación fúngica de polietileno de baja densidad utilizando un consorcio de especies de *Aspergillus* en condiciones controladas”, teniendo como objetivo determinar la biodegradación de polietileno de baja densidad mediante un consorcio de hongos conformados por *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* y *Aspergillus oryzae* en condiciones de laboratorio, usando el caldo de papa dextrosa y caldo czapek dox, en presencia y ausencia del aditivo Tween 80. Realizaron la biodegradación reemplazando la sacarosa con PEBD triturado, los ensayos de biodegradación duraron 55 días, obtuvieron resultados de 26.15% degradación en 55 días, así mismo el análisis FT-IR confirmó la degradación de la muestra degradada y el control en un rango de número de onda 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Concluyendo que empleando cepas de *aspergillus* en condiciones controladas es una alternativa para la degradación de polietileno.

Calcetero y Mancera (2021), en su investigación que lleva por título “Evaluación del proceso de colonización y degradación de polietileno de baja densidad por inóculo de *Aspergillus niger* en humus y compostaje doméstico”, el objetivo de la investigación fue evaluar el proceso de colonización y degradación de PEBD en un cultivo de *Aspergillus niger*, obteniendo como resultado 4.8% de biodegradación de PEBD con un pretratamiento por radiación de UV en 30 días empleando el *Aspergillus niger* con 3.6% sin pretratamiento. Concluyendo que el *Aspergillus niger* es una especie con potencial para la biodegradación.

Cedeño y Merino (2020), en su trabajo de investigación titulada “Valoración *in vitro* de la biodegradación de polietileno de baja densidad mediante hongos filamentosos aislados del relleno sanitario de Pichacay”, tuvieron como objetivo valorar la capacidad de biodegradabilidad *in vitro* del PEBD empleando hongos filamentosos del género *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Trichoderma*, y *Mucor*, aislados del relleno sanitario de Pichacay. Lo realizaron *in vitro* y desinfectaron el PEBD con una solución Tween 80 y NaOH, luego colocaron las muestras en un medio Sabouraud,

PDA y agar extracto de Malta, el análisis mediante la técnica (FTIR) y el período de valoración fue de 90 días. Obtuvieron resultados de *Fusarium* (5.94%), *Aspergillus* (5.16%) y *Trichoderma* (4.98%), los espectros FT-IR evidencian cambios en la química del polímero, concluyendo que aislaron 13 cepas fúngicas causaron biodegradación de polietileno de baja densidad.

Castro y Avendaño (2020), en su estudio titulado “Determinación del pretratamiento más efectivo sobre el polietileno tereftalato para el aumento en la eficiencia del proceso de degradación realizado por hongos y bacterias autóctonas de lixiviados de relleno sanitario”, tuvieron como objetivo determinar el mejor pretratamiento para la digestión del tereftalato polietileno, bajo la acción del *Bacillus cereus*, *Aeromonas hydrophila*, *Penicillium* y *Aspergillus*, para la metodología primeramente aislaron e identificaron las bacterias y hongos de lixiviado del relleno, calcularon el % de eficiencia de biodegradación mediante la prueba de pérdida de masa, como resultado reportaron 17.91% de pérdida de masa, el *Bacillus cereus* y el *Penicillium* son más eficientes. Concluyendo que los microorganismos biodegradaron el PET por la pérdida de peso.

Zhang et al. (2020), en su trabajo de investigación titulado “Biodegradación de partículas de microplásticos de polietileno por el hongo *Aspergillus flavus* de los intestinos de la polilla de la cera *Galleria mellonella*”, sus objetivos fueron aislar microorganismos degradadoras de PE del enriquecimiento del contenido intestinal de *G. mellonella* e identificar las enzimas potenciales degradadoras de PE. Aislaron el contenido intestinal de la polilla de cera *Galleria mellonella* el hongo *Aspergillus flavus* llamado PEDX3, como resultado obtuvieron una degradación de HDPE MPP a 28 días de incubación, asimismo los resultados de (FT-IR) mostraron la presencia de grupos carbonilo y grupos éter de MPP, las oxidasas multicobre similares a lacasas (LMCO), mostraron una expresión regulada positivamente durante el proceso de degradación, que pueden ser las enzimas degradadoras de PE, la cepa *A. flavus* fue la cepa degradadora de PE, PEBD y HDPE. El efecto de biodegradación se confirmó por cambios en la superficie de la partícula y reducción en la masa.

Santacoloma et al. (2019), el artículo titulado “Evaluación de la biodegradación del polietileno, poliestireno y polipropileno, mediante ensayos controlados en suspensión sólida con el hongo *Aspergillus flavus*”, teniendo como objetivo evaluar la biodegradación del polietileno, poliestireno y polipropileno mediante el

*Aspergillus flavus*, incubado en el laboratorio, posteriormente realizaron ensayos de biodegradación y evaluaron la pérdida de peso. El resultado máximo fue 23.6% con el agar YGC y con el polietileno, el análisis estadístico el ANOVA multifactorial aceptó la hipótesis alterna (si existen diferencias entre los agares YGC y SDA en la biodegradación de los plásticos), concluyendo que el *Aspergillus flavus* se desarrolló en el agar YGC, presentando el mejor resultado.

Espinoza (2018), en su investigación titulada “Evaluación de la degradación de polietileno de baja densidad mediada por diferentes especies de hongos”, teniendo como objetivo evaluar la degradación de (PEBD) empleando hongos *Aspergillus sp.*, *Fusarium sp.*, *Cladosporium sp.*, *Pleurotus ostreatus*, *Trichoderma harzianum* y *Penicillium sp.*, cultivaron por un período de 30, 60 y 90 días, donde registró la masa del PEBD antes y después del cultivo. Obtuvo como resultado una pérdida de peso, un análisis de espectroscopía (FTIR) no encontró alteración en la estructura molecular del PEBD y el análisis (SEM), encontró actividad metabólica de los hongos y confirmó el crecimiento y adherencia a la superficie del plástico. Concluyendo que la cepa de *Fusarium* fue la apta para degradar PEBD, mostrando una pérdida de 0.99% en un periodo de 90 días, la cepa de *Aspergillus* fue de menor grado con 0.105% en 60 días y 0.441% en 90 días.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Taipe y Tovar (2023), en su investigación “Evaluación del efecto del medio de cultivo, temperatura y tiempo de contacto en la degradación de PEBD y PET por el *Aspergillus niger*”, tuvieron como objetivo evaluar el efecto del medio de cultivo, temperatura y tiempo en la degradación del PEBD y PET con el hongo *Aspergillus niger*, en primera instancia aislaron el hongo de un limón en estado de putrefacción el cual dispusieron en el cultivo de agar y caldo nutritivo junto con las láminas de polietileno a una temperatura de 25 °C en un tiempo de 10, 20 y 30 días. Obtuvieron como resultado mayor 23.47% y 14.79%, y resultado menor fue de 0.60% y 0.33% para PEBD y PET en un periodo de 30 y 10 días, en un medio de cultivo líquido.

Mostajo y Ambur (2022), presenta como título “Efectividad de *Aspergillus* en la degradación de polietileno”, con el objetivo de determinar la efectividad degradadora de cepas en suelo, para la evaluación se aislaron restos de plásticos de botaderos, la identificación taxonómica lo realizaron mediante el sistema propuesto por Pitt

(2001), obteniendo como resultado 44% de degradación de bolsas de polietileno empleando el *Aspergillus flavus* y 40% de *Aspergillus fumigatus*. Concluyendo que el *Aspergillus flavus* degrada 50%, *Aspergillus oryzae* 33.3% y *Aspergillus fumigatus* con el 16.6% correspondiendo a las bolsas de baja densidad.

Andia y Perez (2020), en el estudio de investigación “Eficiencia de la degradación de fragmentos plásticos de polietileno PEBD utilizando el hongo *Aspergillus tubingensis* en suelo agrícola, Lurin-2020”, tuvieron como objetivo aislar al hongo *Aspergillus tubingensis* en la degradación del (PEBD), aislaron el hongo de hojas degradadas, usando el cultivo papa dextrosa agar, a 27 °C y pH 7, durante 3 meses, 3 meses y 15 días y 4 meses, obtuvieron resultados de degradación del 58%, 76% y 81% con una dosis de 20 mL, 30 mL y 40 mL de solución de esporas en un tiempo de 3 meses y 15 días, pH 7 y humedad de 75% en la cámara de degradación. Concluyendo que el hongo *Aspergillus tubingensis* obtuvo mejores resultados de biodegradación con 86% en una dosis de 40mL, durante 3 meses y 15 días.

Torres (2020), en su investigación que lleva por título “Efectividad del hongo *Aspergillus niger* en la biodegradación de polietileno de baja densidad”, tuvo como objetivo determinar la efectividad del hongo *Aspergillus niger* en la biodegradación de polietileno de baja densidad, teniendo una población utilizó 875 cm<sup>2</sup> de bolsa de polietileno, con 10 láminas de 4 cm<sup>2</sup>, para la identificación se aisló el hongo de una naranja putrefacta en el agar PDA, el cultivo estaba en un biorreactor Airlift con una bomba pequeña a un pH de 5 a 6, obtuvo como resultado 6.9% de biodegradación de PEBD, a una temperatura de 20 °C a 30 °C y un pH adecuado. Concluyendo que al realizar el proceso de biodegradación presenta resultados significativos.

Portella (2019), en su investigación “Determinación de la capacidad degradativa de plásticos por cinco especies de hongos del botadero Muyuna”, teniendo como objetivo determinar la capacidad degradativa de plásticos por hongos del botadero Muyuna, aisló cinco especies la eficiencia de degradación, mediante el método de microcultivo para la identificación, como resultado obtuvieron 28% del *Geotrichum sp.*, 80% del *Aspergillus sp 1*, 60% del *Aspergillus sp*, 11.6% de *Fusarium sp.* y 27.6% *Oidium sp.* concluyendo que ailo 17 especies fúngicas, se identifico 5 especies elegidas al azar *Geotrichum sp*, *Aspergillus sp1*, *Aspergillus sp2*, *Fusarium sp* y *Oidium sp.*

Hermoza (2019), en su trabajo de investigación “Biodegradación microbiana de polietileno de baja densidad, bajo condiciones térmicas controladas en biorreactor Airlift, en Santa Clara – Lima 2019”, teniendo como objetivo biodegradar del polietileno de baja densidad PEBD empleando *Pseudomona aeruginosa* y *Aspergillus brasiliensis* en un biorreactor Airlift, para las pruebas utilizó dos muestras, una de 50 mg/L y otra de 100 mg/L dentro del biorreactor airlift durante 7 días a condiciones térmicas controladas. Los resultados de biodegradación de *Pseudomona aeruginosa* fue 2% con una concentración de 49 mg/L a 21.8°C, pH de 6.5 y OD de 6.8 mg/L, así mismo *Aspergillus brasiliensis* 7% a una concentración de 93 mg/L a 22.1°C, 7.14 de pH y 7.45 mg/L de OD. Concluyendo que en condiciones propicias los microorganismos pueden degradar el PEBD.

### **2.1.3. Antecedentes locales**

Gonzales (2019), en su investigación titulada “Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno”, el objetivo fue determinar la capacidad biodegradativa por hongos filamentosos frente al polietileno. Aisló los hongos del botadero Cancharani, identificó mediante características macroscópicas y microscópicas empleando la técnica de microcultivo en láminas de polietileno; a un pH 5, temperatura de 20°C durante 20 días, e incubó mediante la técnica de Kavelman y Kendrick a 20 y 30°C, pH de 4.5 y 8 aisló a *Aspergillus Flavus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus fumigatus*, *Mucor sp.* y *Fusarium sp.*, la evaluación de la biodegradación del polietileno por *Aspergillus flavus* y *Aspergillus niger* demostró que el primero exhibió una mayor actividad biodegradadora en un entorno ácido pH 4.5 y temperaturas de 20 y 30°C.

Butron (2020), en su trabajo de investigación “Capacidad de biodegradación de *Pseudomonas aeruginosa* frente al polietileno de baja densidad”, teniendo como objetivo evaluar la capacidad de biodegradación de *Pseudomonas aeruginosa* frente al polietileno de baja densidad, aisló la bacteria del botadero de Cancharani, la identificó con características macroscópicas y microscópicas, la bacteria se realizó en un medio mineral a una 25 °C y 35 °C con un pH de 5 y 7 por un periodo de 30 días, obtuvo un 21.7% y 27.3% de pérdida de peso. Concluyendo que la temperatura y pH si influyen en la biodegradación de polietileno de baja densidad.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Plásticos**

El plástico es un material polimérico orgánico (Méndez et al., 2007), que está compuesto por largas cadenas de polímeros, moléculas de gran tamaño (Mogollón & Sarmiento, 2020), es decir cualquier material sintético adquirido mediante el proceso de multiplicación artificial o polimerización a partir de los átomos de carbono conformados por moléculas orgánicas (Escandon, 2021; Vargas, 2020), son resistentes a la degradación física, química y biológica (Contreras & Cubas, 2020).

Son elaborados a partir de derivados del petróleo crudo (Contreras & Cubas, 2020; Escandón, 2021; Méndez et al., 2007), también del carbón, gas natural, material vegetal (Mogollón & Sarmiento, 2020), este material es muy apreciado gracias a sus propiedades como: durabilidad, estabilidad, versatilidad y resistencia a condiciones ambientales (Méndez et al., 2007), factibilidad de ser moldeados, baja densidad, baja conductividad eléctrica, impermeabilidad (Mogollón & Sarmiento, 2020; Vargas, 2020), resistencia a la corrosión, resistencia a factores químicos, biológicos, y su bajo costo (Méndez et al., 2007; Mogollón & Sarmiento, 2020).

#### **a. Bolsas plásticas**

Las bolsas son elaboradas a base de gas natural o petróleo, a partir de 1961 es utilizada y se fabrican cerca de 500 billones a un trillón de plásticos en un año en todo el mundo, se obtienen gracias a la polimerización del etileno (derivado del petróleo), denominado polietileno, el etileno es un compuesto químico orgánico hidrocarburo con enlaces de hidrógeno y carbono formado por dos átomos de carbono y cuatro de hidrógeno ( $C_2H_4$ ) (Gutiérrez, 2019).

### **2.2.2. Polímeros**

Un polímero es una macromolécula conformada por monómeros unidas por enlaces covalentes formando cadenas de moléculas (Butron, 2020; Erazo, 2018; Torres, 2020), su disposición espacial son lineales o ramificados (Erazo, 2018), según su origen los polímeros pueden ser naturales o sintéticos (Avila & Morán, 2021; Butron, 2020; Torres, 2020), los sintéticos presentan una estructura más simple a diferencia de los naturales (biopolímeros) que presentan estructuras complejas (Butron, 2020).

Los polímeros orgánicos formados por átomos de carbono (Erazo, 2018), como: caucho, gomalaca, celulosa (Torres, 2020), son más utilizados para productos como textiles y papel (Avila & Morán, 2021). Los polímeros sintéticos presentan mayor interés desde el punto de vista comercial (Butrón, 2022), los polímeros sintéticos están formados por átomos de silicio (Erazo, 2018), como el polietileno y el poliestireno (Torres, 2020), los polímeros artificiales contienen materia prima como el polietileno que son plásticos más usuales fáciles de usar, las propiedades de los polímeros se detallan en la tabla 1, los sintéticos son flexibles se conocen como termoplásticos, mientras los rígidos se conoce como termoestable, existen propiedades similares al caucho conocidos como elastómeros (Avila & Morán, 2021; Torres, 2020).

Tabla 1

*Propiedades de los polímeros*

<b>Propiedad</b>	<b>Descripción</b>
Fragilidad	Son frágiles y a altas temperaturas se pueden deformar
Elasticidad	La propiedad de la elasticidad les hace adecuados para la fabricación de neumáticos.
Reflexividad	Se refiere a que no reaccionan químicamente con el ambiente que les rodea, estos son útiles para la producción de películas reflectantes, que se usan para diversas tecnologías en la industria eléctrica.
Resistencia al impacto	Por esta propiedad soportan procesos rudos y en cubiertas protectoras y parachoques de automóviles.

Fuente: Avila y Morán, 2021.

**a. Características de los polímeros**

- Estabilidad térmica: es la capacidad de un material para resistir un cambio físico, un proceso mediante el cual la acción de la temperatura provoca una pérdida de propiedades del material.
- Solubilidad: de un polímero varía en función de su estructura química y del peso molecular, las fracciones solubles de bajo peso molecular.
- Densidad: la mayoría de los polímeros la densidad es constante.
- Reactividad química baja: las reacciones de adición y de condensación, conocida como polimerizaciones de crecimiento en cadena, el monómero intacto se une para formar cadenas lineales o ramificadas.

- Ductilidad: mide la capacidad de una probeta de sufrir una deformación plástica antes de romperse, en otras palabras, es una medida de cuánto se estira una muestra antes de romperse.
- Punto de fusión: es un proceso donde el polímero pasa de un estado sólido a uno líquido
- Aislante térmico y eléctrico: presenta una resistencia relativamente alta a la corriente eléctrica.
- Maleabilidad: es la capacidad de un material para ser deformado sin romperse o perder sus propiedades físicas y químicas (Hermida, 2011).

## b. Clasificación de los polímeros

La clasificación de los polímeros se detalla en la tabla 2, se pueden clasificar por varios criterios según su composición, origen, estructura y comportamiento frente al calor (Erazo, 2018).

Tabla 2

*Clasificación de los polímeros*

	Según su	Clasificación
Polímeros	Composición	- Homopolímero - Heteropolímeros
	Origen	- Naturales - Sintéticos
	Estructura	- Lineales - Ramificados - Entrecruzados - Reticulados
	Comportamiento frente al calor	- Termoplásticos - Termoestables

Fuente: Erazo, 2018.

- **Polímeros sintéticos**

Son macromoléculas producidos en el laboratorio a partir de sustancias que pueden encontrarse en la naturaleza y producidos a nivel industrial por la transformación del petróleo y carbón, pueden encontrarse como un compuesto poliacrilamida, los monómeros se usan para producir los polímeros, las ventajas son: bajos costes de producción, acabados superficiales, durabilidad, versatilidad en los procesos de producción (Erazo, 2018).

- **Polímeros naturales**

Son macromoléculas que son sintetizados en el interior de los seres vivos, estas moléculas se originan a partir de reacciones bioquímicas constituidos por diferentes polisacáridos como proteínas, almidón, celulosa, entre los materiales son el caucho, la seda y la laca, las principales materias primas son polímeros extraídos de la biomasa, monómeros derivados de la biomasa, polímeros producidos por microorganismos (Erazo, 2018).

### 2.2.3. Polietileno

El polietileno (PE)  $(C_2H_4)_n$  es un termoplástico compuesto por carbono e hidrógeno (Mogollón & Sarmiento, 2020), estos compuestos están formados por monómeros de olefinas y cloruro de polivinilo (Méndez et al., 2007), es una resina sintética, ligera y versátil, a partir del proceso de la polimerización del etileno el PE es parte de la familia de resinas de poliolefina, que es un hidrocarburo constituido por petróleo y gas natural, se utiliza para la fabricación de plásticos transparente (envoltura), botellas, bolsas, tanques para combustible, tuberías y películas (Avila & Morán, 2021; Méndez et al., 2007; Torres, 2020) este material se puede cortar o hilar en fibras sintéticas y lograr la elasticidad (Ávila & Morán, 2021).

El polietileno se clasifica en tres tipos según el grado de polimerización, polietileno de alta densidad, polietileno de media densidad, polietileno de baja densidad, el etileno (monómero) se polimeriza formando polietileno (polímero) como se observa en la figura 1 (Mogollón & Sarmiento, 2020).

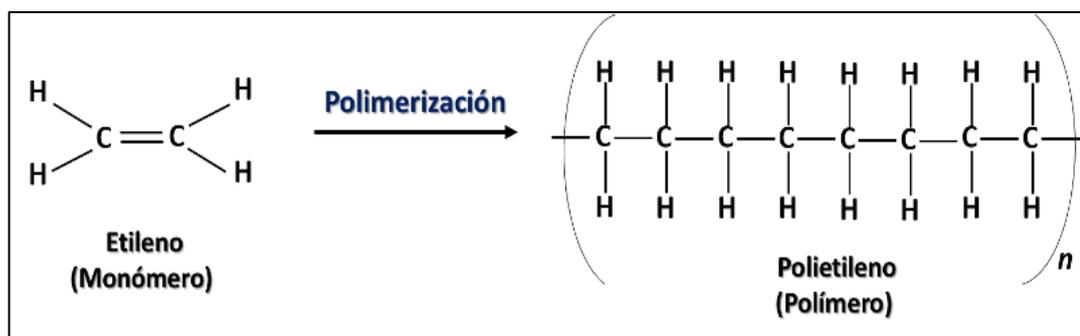


Figura 1. Polimerización del polietileno (PE).

Fuente: Mogollón y Sarmiento, 2020.

**a. Polietileno de alta densidad HDPE**

Es un material que presenta un grado de cristalización de 90%, cuya temperatura de fusión ( $T_m$ ) es 132 °C y su densidad es entre 0.95 a 0.97 g/cm<sup>3</sup>, utilizado para envases de detergentes, lejía, pintura, lácteos, helados, aceite para consumo, aceite automotor, shampoo, bolsas para supermercados, cajones para cervezas, gaseosas, pescado; tuberías para gas, telefonía, agua potable, láminas de drenaje, también en construcción de embarcaciones (Mogollón & Sarmiento, 2020).

**b. Historia**

El polietileno fue desarrollado por científicos europeos, descubierto por primera vez por el químico alemán Herman Staudinger en la década de los 20, recibió el premio nobel en 1953, otros científicos colaboradores como Eugen Baumberger y Frederich Tschirner, caracterizaron el polietileno en 1898, y empezaron a desarrollar otros compuestos, a inicios de 1933 Fawcett y Reginald Gibson científicos que empezaron a fabricar de manera industrial en ICI chemicals en Inglaterra (Vargas, 2020).

**c. Propiedades**

El PE presenta propiedades como alta resistencia al impacto, alta flexibilidad, tenacidad, procesabilidad, estabilidad y propiedades eléctricas, resistente al agua incluso a altas temperaturas, así mismo es atacado por agentes oxidantes, alifáticos, aromáticos y clorados, provocan hinchazón a temperatura ambiente, solubles en disolventes polares como alcoholes, ésteres y cetonas, la permeabilidad al agua es baja comparado con otros polímeros y permeabilidad ha compuestos orgánicos polares como alcohol o ésteres (Mogollón & Sarmiento, 2020).

**d. Clasificación de los plásticos para el reciclaje**

El reciclaje de los plásticos se realiza según la clasificación del tipo de polímero, densidad y temperatura en la que se trabaja, al momento de reciclar el plástico se le modifica sus propiedades para ser utilizados en nuevos productos. Para la identificación se emplea un sistema de códigos, donde existen 7 grupos de polímeros con propiedades específicas como se visualiza en la tabla 3, además se usa a nivel mundial y se denominan commodity (tanto amorfos como semi-cristalinos). El proceso emplea reactores y maquinaria con sistemas cerrados, que controlan condiciones de temperatura para evitar la emisión de ftalatos cancerígenos y desechos

tóxicos al ambiente, existen tres tipos de procesos para reciclar el plástico como el reciclaje distribuido, compresión por temperatura, despolimerización térmica o pirolisis (Urra, 2018).

Tabla 3

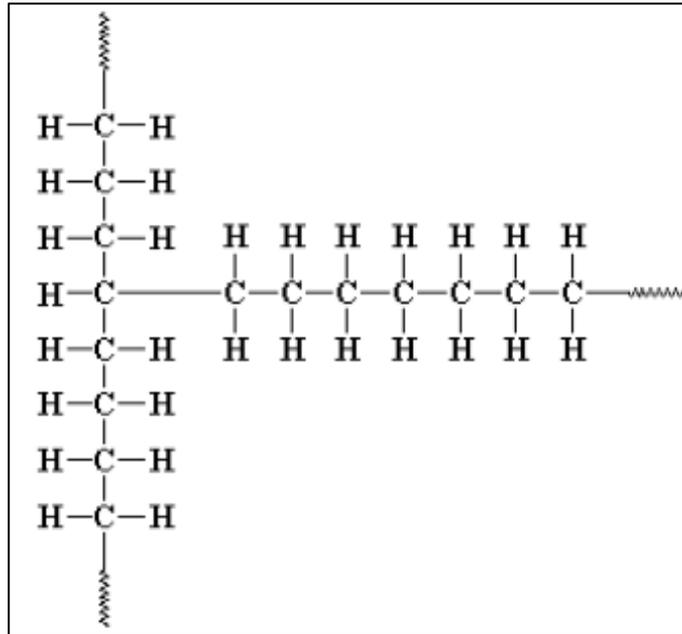
*Clasificación de polietileno para el reciclaje*

Clasificación	Código	Ejemplo
PET Tereftalato de Polietileno		Botellas de bebidas, paquetes de comida, botes de crema y usos farmacéuticos.
HDPE Polietileno de alta densidad		Envases no transparentes como botellas de leche, detergentes o de aceite para motores.
PVC Policloruro de vinilo		Tarjetas de crédito, tuberías, revestimiento de cables, pieles sintéticos, marcos de puerta y ventana
PEBD Polietileno de baja densidad		Film adhesivo, bolsas de la compra, botella flexible, bolsas de suero o aislantes de cableado.
PP Polipropileno		Tapones, tupperwares, neveras portátiles, piezas de automóviles, fibras de tejidos o jeringuillas.
PS Poliestireno		Vasos para bebidas calientes, envases de yogurth, cubiertos de plástico, rellenos para embalaje o bandejas de comida.
Otros (Resinas epoxidicas) como el nylon y acrílicos.		Mezclas de varios plásticos empleados en artículos electrónicos, electrodomésticos, piezas industriales, artículos médicos, garrafas de fuentes de agua o colchones

Fuente: Rodríguez, 2021.

#### 2.2.4. Polietileno de baja densidad

El polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE), es un polímero sintético termoplástico derivado del petróleo (Ararat & Murillo, 2016; Avila & Morán, 2021), conocido también de alta presión, familia de los polímeros olefínicos (Jubedi S.L., 2019), conformado por unidades de etileno gaseoso (Gómez, 2014). Es un sólido parcialmente cristalino de estructura muy ramificada (figura 2) con una densidad baja de  $0.90 - 0.91 \text{ gr/cm}^3$ , se funde a los  $115 \text{ }^\circ\text{C}$ , se polimeriza a una alta presión, 1500-2000 bar y  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  con catalizador e iniciación por radicales libres (Gómez, 2014).



*Figura 2.* Estructura molecular del polietileno de baja densidad.  
Fuente: Cruz, 2016.

La polimerización comienza cuando el iniciador se descompone en radicales libres las cuales reaccionan con el etileno, y finaliza cuando se combinan dos grupos de radicales libres, o cuando un radical hidrógeno se transfiere de una cadena a otra (Mostajo, 2021), se degrada en 150 años en un medio natural, es un material reciclable (Butron, 2020), el producto de este proceso es un material sólido flexible, que son rígidos, resistentes a la tracción y a las temperaturas (Vargas, 2020).

#### **a. Uso en el mercado**

Debido a su costo es muy utilizado en sectores como: automotriz, industrial, textil, eléctricos o electrónicos, agricultura, alimentación (Torres, 2020), en el sector eléctrico como aislante eléctrico y revestimiento de cables eléctricos, en el sector alimentación como envoltorio, bolsas, envasado. Se utiliza para la fabricación de tuberías, materiales e inyección por moldeo (Vargas, 2020). Utilizados para la fabricación de bolsas de basura y comestibles, juguetes, mantillos agrícolas, botellas exprimibles, y artículos para el hogar. Se le añade un código de reciclaje conocido con # 4 (tabla 3) (Ávila & Morán, 2021).

## b. Propiedades físico-químicas

El PEBD viene a ser un polímero con ramas que se expanden a lo largo de la cadena del polímero de forma irregular como se observa en la figura 2, por lo que puede convertirse en un enlace de carbono, por lo que puede ser lineal o formar una estructura, lo que aumentará el volumen y reducirá la densidad del polímero, una desventaja del polietileno de baja densidad debido a que el material es mucho más caro en todo el mundo porque es difícil de fabricar, las características y propiedades del PEBD se detallan en la tabla 4 (Ávila & Morán, 2021).

Tabla 4

*Características y propiedades del polietileno de baja densidad*

Características	Propiedades	Usos
- Bajo costo	Propiedades mecánicas	- Usado para envoltorio
- Resistencia térmica	- Alargamiento a la rotura 400%	- Bolsas de plástico
- Resistencia química	- Dureza Rockwell D41-46	- Bolsas de basura
- Fácil de producir	- Módulo de tracción GPa 0,1-0,3	- Envases de plástico films
- Resistencia a bajas temperaturas	- Resistencia a la tracción MPa 5-25	- Tapas flexibles
- Aislamiento eléctrico	- Resistencia al impacto Izod Jm <sup>-1</sup> >100	- Botellas
- Baja absorción del agua	Propiedades físicas	- Bolsas de supermercado
- Color lechoso, transparente	- Absorción de agua en 24h (%) <0,015	- La capa de cartones de leche
- Flexible que el polietileno de baja densidad	- Densidad g/cm <sup>-3</sup> 0,92	- Aplicaciones de alambre, cable
- Se puede procesar por inyección o extrusión	- Índice refractivo 1,51	- Dispositivos protectores (cascos, rodilleras, coderas)
	- Índice de oxígeno límite (%) 17	- Arandelas
	- Inflamabilidad SI	- Distanciadores
	- Punto de fusión 110°C	- Tapones
	Propiedades eléctricas	- Capuchones
	- Constante dieléctrica 1MHz 2,2-2,35	- Envases de alimentos
	- Factor de disipación a 1MHZ 1 – 10 x 10 <sup>-4</sup>	- Envase de detergente
	- Resistencia dieléctrica (kV mm-1) 27	- Juguetes
	- Resistividad superficial (Ohm/sq) 1013	- Pallets
	- Resistividad de volumen a (Ohm·cm) 1015 – 1018.	- Impermeabilización de terrenos
		- Piezas para el sector automóvil

Fuente: Jubedi S.L., 2019; Butron, 2020; Ararat & Murillo, 2016.

### **2.2.5. Contaminación por plásticos**

Contaminación por plásticos es nombrar los impactos ambientales de este material en los componentes agua, suelo, aire y biota, donde se dé la menor interferencia o alteración de los procesos naturales por presencia de los plásticos (Gil, 2020), a causa de las actividades domésticas e industriales (Flores, 2020) y al consumismo intensivo de productos (Jaén et al., 2019), los cuales están fabricados por polietileno (Méndez et al., 2007).

La inadecuada gestión de los residuos plásticos se debería destinar a un uso posterior como el reciclaje, reutilización y rediseño (Gil, 2020), puesto que requiere un espacio considerable para su disposición (Mostajo & Ambur, 2022) por las grandes cantidades de residuos que se generan (Navarro et al., 2022), porque son difíciles de degradar en ambientes naturales por su persistencia en el tiempo (Flores, 2020), generando impactos ambientales (ecosistemas acuáticos, terrestres) (Jaén et al., 2019; Navarro et al., 2022), sociales y económicos (Jaén et al., 2019).

La permanencia en los ecosistemas puede ocasionar muerte en los animales por consumo o atrapamiento (Ccallo et al., 2020; Mostajo & Ambur, 2022), por la toxicidad y bioacumulación que pueden emitir (Gil, 2020) bajo la forma de nanoplásticos (< 1  $\mu\text{m}$ ), microplásticos (< 1 mm) y macroplásticos (Flores, 2020), que se acumulan en el fondo marino (Navarro et al., 2022), ello facilita a la formación de dioxinas, toxinas que hacen daño al sistema reproductor y pueden causar cáncer (Méndez et al., 2007), porque pueden infiltrarse en la cadena trófica (Flores, 2020), en el ecosistema puedan provocar fenómenos como obstrucción del agua además la pérdida de fertilidad de suelos para los cultivos (Ccallo et al., 2020), los plásticos en la capa superficial en los océanos limita la entrada del oxígeno y luz solar, que son importantes para los procesos biológicos (Gil, 2020).

### **2.2.6. Residuos sólidos**

Los residuos sólidos comprenden todos los residuos que provienen de actividades animales y humanos, que normalmente son sólidos y que son desechados como inútiles o superfluos, el concepto de residuos sólidos comprende la masa heterogénea de desechos de la comunidad urbana como la acumulación más homogénea de los residuos agrícolas, industriales y minerales, los desechos son desperdicios o sobrantes de las actividades humanas, se clasifica en gases, líquidos y sólidos; y por

su origen, en orgánicos e inorgánicos (Huamaní, 2017), destinado al abandono por su productor o poseedor, siendo resultado de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza (Rivera del Río, 2016).

### **2.2.7. Tecnologías de tratamiento de residuos plásticos**

#### **a. El reciclaje químico**

Es un proceso donde las macromoléculas de los polímeros son triturados y transformados en compuestos de bajo peso molecular, por un proceso de separación y purificación. Bajo condiciones de temperatura, presión y catalizadores, los monómeros se purifican y vuelven a usarse con las mismas características de un polímero original, existen 4 métodos tecnológicos que se describen a continuación (Roncacio, 2016).

#### **b. Pirólisis**

Conocido como degradación térmica de los residuos plásticos se da en un medio ausente o bajo de oxígeno, los compuestos del plástico termofijos y termoplásticos serán reducidos con un bajo peso molecular, es un proceso donde los materiales entrantes se transforman en gases y/o sólidos, se expone a una temperatura de 500 °C, obteniendo al componente inicial que originó el material (Roncacio, 2016).

En este proceso se destruyen los enlaces del plástico, posteriormente cambia al estado líquido, después se eleva la temperatura a 500 o 520 °C donde el líquido se transforma al estado gaseoso, estos gases son enfriados con nitrógeno líquido cuando pasan a una salida de escape que se depositan en tanques de agua, de este proceso se producen 25% querosene, 25% diésel, 25% gasolina, 10% grasas y el 10% está conformado por residuo plástico conocido como ripio empleada para fábrica de madera plástica (Roncacio, 2016).

#### **c. Hidrogenación**

Proceso donde el plástico introducido a un reactor expuesto a una temperatura de 500°C y a una presión de 200 bar, las macromoléculas se dividen térmicamente generando espacios vacíos los cuales se llenan por H, Cl, N, O se transforman en formas hidrogenadas y estas estructuras se almacenan por un tiempo largo hasta su tratamiento petroquímico, estas estructuras son similares al crudo de petróleo (Roncacio, 2016).

#### **d. Gasificación**

Es una tecnología que requiere agentes gasificantes como vapor de agua y oxígeno para obtener gases de un alto poder calorífico los que serán usados para producir químicos o combustibles, la gasificación de plásticos genera combustibles líquidos, gaseosos y residuos de carbón. El conjunto de reacciones termoquímicas se lleva mediante cuatro etapas: la primera consiste en la oxidación donde el plástico es sometido a temperaturas altas, donde se presentan reacciones exotérmicas, el segundo consta de la reducción del plástico en ausencia de oxígeno, produce hidrógeno molecular y monóxido de carbono, el tercero es la pirólisis donde el calor de los residuos se convierten en gas, en la etapa final los gases calientes son usados para la evaporación del agua contenida en los residuos sólidos urbanos (RSU) entrantes (Roncacio, 2016).

#### **e. Metanólisis**

Es un proceso avanzado donde se introduce el metanol a los plásticos para descomponer hasta sus moléculas básicas, finalmente ser repolimerizados para la producción de resina virgen, la metanólisis es la despolimerización de los plásticos sometidos a un alto nivel de metanol con catalizadores (trisopropóxido de aluminio, acetato de zinc y sales de ácido arilsulfónico), a una presión de 20 a 25 Kg/cm<sup>3</sup>, a una temperatura de 180-280 °C, el metanol es reusado para otros procesos y los monómeros serán usados en fibras para nuevos plásticos, en este proceso se realizan tres etapas: primero es la filtración centrífuga, la segunda es la cristalización multi etapa, en la tercera está la destilación al vacío (Roncacio, 2016).

### **2.2.8. Tratamientos mecánicos**

#### **a. Reducción de residuos**

Consiste en la educación del consumidor que es la adquisición moderada, adecuada, y consciente de los productos, tomando en cuenta los efectos que causen en el ambiente, si son materiales reciclables y degradables algunos países europeos implementaron un modelo que le daba la idea básica al consumidor para identificar productos con logotipos de punto verde, indicando que el fabricante contribuye en la recuperación y reciclaje de los empaques (Sotomayor & Power, 2019).

**b. Reutilización**

Es una alternativa para el reusó de productos y empaques, productos como ropa usada, libros, muebles, electrónicos, piezas de autos, cables, son productos que tienen acogida por algunos consumidores (Sotomayor & Power, 2019).

**c. Reciclaje**

Proceso donde se extraen materiales de flujo de residuos los cuales se reutilizan y se transforman devolviendo su potencial a los materiales para reincorporarlos en la fábrica de nuevos materiales (Cortolima, 2002), los materiales de alto valor para el reciclaje son los metales, vidrio y papel, los plásticos son reciclables, el tereftalato de polietileno (PET) se emplean para fabricar tejidos, mantas, envases a partir de las fibras textiles (Sotomayor & Power, 2019).

**d. Biorremediación**

La biorremediación es un proceso biotecnológico usado para degradar plásticos haciendo uso de organismos vivos para remediar contaminantes, sustancias tóxicas, con el objetivo de acelerar los ciclos naturales empleando colonias microbianas (Arotoma et al., 2021) y luego transformarlos en productos inocuos como el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O (Cáceres, 2011).

**2.2.9. Biodegradación microbiana**

La biodegradación es la capacidad de las diferentes cepas de microorganismos como bacterias, hongos o protozoos, que pueden ser aerobias (CO<sub>2</sub>) o anaerobias (Carrillo, 2019), usando el polímero sintético como única fuente de carbono y energía (Cedeño & Merino, 2020; Gutiérrez, 2019; Santacoloma et al., 2019). En el proceso de biodegradación del polímero, existen dos casos distintos: una es la acción directa, donde el PEBD proporciona alimento para el desarrollo de los microorganismos y la acción indirecta ocurre cuando el microorganismo produce metabólicos que afectan a la estructura del PEBD (Santacoloma et al., 2019).

La biodegradación por microorganismos tiene una correlación con la producción de enzimas (Prada & Rojas, 2020), los microorganismos liberan enzimas sobre el polímero (Condori, 2020, Cáceres, 2011), las enzimas atacan a los segmentos pequeños, el producto final sale con un menor peso molecular, teniendo como subproducto a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (Gutiérrez, 2019).

El porcentaje (%) de biodegradación de cada muestra se calcula utilizando la fórmula de Choquehuanca y Sandoval (2023) (ecuación 1), se realiza teniendo los datos del peso inicial y final de las láminas de PEBD. El % de biodegradación se calculó restando el peso inicial menos el peso final entre el peso inicial todo multiplicado por cien (Calcetero & Mancera, 2021).

$$\% \text{ de biodegradación} = \left( \frac{W_{inicial} - W_{final}}{W_{inicial}} \right) \times 100 \quad (1)$$

#### a. Factores que influyen en la biodegradación de PEBD

La biodegradación es un proceso lento debido a la característica de resistencia presenta el PEBD a degradarse, esto se debe a los factores ambientales o relativos a la exposición, abiótico (humedad, luz solar, temperatura, pH) o bióticas (enzimas, hidrofobicidad), los relativos a los polímeros (peso molecular, tamaño, forma, aditivos y biosurfactantes). Pero cada entorno es diferente por consecuencia la biodegradación es distinta en el océano o en el vertedero, debido a que los factores que se describen más adelante, estos factores alteran la homogeneidad del polímero y provocan la formación de nuevos grupos funcionales (Campos, 2021).

- *Aspergillus sp.*

Las diferentes especies del *Aspergillus sp.* presentan ventajas como su amplia distribución en los ecosistemas y la facilidad de aislamiento del suelo y desechos, según varios estudios el *Aspergillus sp.* tiene la capacidad de descomponer polímeros y materiales plásticos por medio de la producción de diversas enzimas, a su vez hidrofobinas que son proteínas fúngicas que pueden aumentar la capacidad de biodegradación de los plásticos, el *A. niger* y *A. flavus* son las especies con mayores porcentajes de biodegradación por producir diferentes enzimas como la lipasa, esterasa, ureasa (Nasrabadi et al., 2023).

- **Duración del contacto**

La duración de contacto entre el *Aspergillus sp.* y el PEBD, puede ser desde 0, 5, 10, 30, 60 a 200 días, en los primeros días los hongos pueden crecer rápidamente y descomponer los fragmentos de polietileno, dejando a los fragmentos más

resistentes, terminando el medio de cultivo disminuye la segregación de enzimas, por ende se reduce o se detiene la biodegradación con el tiempo, algunas especies como el *A. fumigatus* degrada el 65% de poliuretano en 14 días, como también el *A. niger* y *A. terreus* degradaron el PEBD 35% en 17 días y 8% en 60 días, por último el *A. flavus* degrado HDPE 5.5% en 100 días (Nasrabadi et al., 2023).

- **Mecanismos enzimáticos**

La biodegradación biológica presenta dos categorías de enzimas extracelulares y enzimas intracelulares, las principales enzimas son lipasa, proteinasa K, deshidrogenasa (Santacoloma et al., 2019). El ataque enzimático causa una erosión superficial que a su vez depende de las propiedades superficiales de los polímeros como: elevada hidrofobicidad, reducida área superficial y topografía plana de la superficie (Campos, 2021).

Las enzimas cumplen la función de catalizadores biológicos, acelerando reacciones químicas en organismos vivos, las enzimas se emplean en diferentes industrias como la farmacéutica, alimentaria, textil, asimismo en la elaboración de biocombustibles y de biorremediación, las enzimas que desempeñan un papel importante en la degradación de polímeros por *Aspergillus sp.* son la esterasa, lacasa, oxidasa, lacasa (LMCO), peroxidasa, lignasa, celulasa, celobiohidrolasa, lipasa y ureasa, en un estudio ilustró que las enzimas esterasas y lipasas son capaces de descomponer el PET en trozos más pequeños (Nasrabadi et al., 2023).

**Lacasa:** es una enzima que se encuentra en distintas especies de *Aspergillus*, hongos, bacterias y plantas, es una enzima oxidasa que contiene cobre, cataliza diferentes sustratos, como fenoles, aminas y compuestos cíclicos, de igual forma esta enzima tiene un papel en la purificación, producción de pulpa, teñido y producción de papel, su función en la biodegradación de los polímeros consiste en convertir la biomasa y gases microbianos, la lacasa puede afectar los enlaces químicos del plástico, llevando a la degradación estructural del polímero, el proceso implica romper las cadenas en fragmentos más pequeños para que los microorganismos pueden absorber y mineralizar, la eficiencia de la lacasa puede variar según el tipo de polietileno y las condiciones ambientales (Nasrabadi et al., 2023).

La enzima lacasa permite la ejecución de reacciones oxidativas, la degradación de polímeros, al usar oxígeno como aceptor de electrones, la lacasa genera especies reactivas de oxígeno, incluidos radicales hidroxilos, que permite romper las cadenas de polímeros, la lacasa puede generar radicales libres durante su ciclo catalítico, estos radicales libres pueden atacar la estructura del polímero rompiendo su cadena de carbono, elimina el polímero en fragmentos más pequeños. Asimismo, se descubrió que la lacasa presenta una relación sinérgica con otras enzimas, como la peroxidasa, esta enzima presenta estabilidad y actividad sólida enzimática en diferentes temperaturas y niveles de pH, las características facilitan que la lacasa funcione eficazmente en distintas condiciones ambientales, la hace adaptable y adecuada para diversos entornos de trabajo (Nasrabadi et al., 2023).

**Esterasa:** es un tipo de enzima hidrolasa, se encuentra en diferentes organismos como bacterias, hongos, plantas y animales, la esterasa se usa en la industria alimentaria, química y farmacéutica, la esterasa puede dividir las cadenas de polímeros en fragmentos de bajo peso molecular, que luego se absorben en la membrana celular microbiana, la enzima esterasa afecta a un tipo de plástico como: PET, PEBD, PB y PU (Nasrabadi et al., 2023).

Esta enzima juega un papel en la descomposición y el metabolismo de los compuestos éster, como el PET y el PU, contienen enlaces éster en su estructura, estos enlaces éster pueden unirse a la enzima y aumenta la tasa de hidrólisis, la naturaleza de las enzimas esterases les permite descomponer eficientemente una gama de sustratos, la esterasa puede atacar y degradar diferentes polímeros plásticos como sustrato (Nasrabadi et al., 2023).

**Peroxidasa:** es una familia de enzimas que catalizan la oxidación de sustratos utilizando peróxido de hidrógeno como aceptores de electrones, se encuentra en plantas, animales y bacterias, las peroxidasas desempeñan funciones en el sistema inmunológico, la degradación de la lignina y la cicatrización de heridas. Las enzimas son intracelulares en la mayoría de los organismos vivos, excepto en los animales, la peroxidasa se clasifica en peroxidasa de manganeso, de lignina, versátiles y de color, su capacidad para oxidar sustratos con un alto potencial redox, se utiliza en la biodegradación de polímeros plásticos (Nasrabadi et al., 2023).

La enzima peroxidasa se encuentra en los hongos *A. calidoustus*, *A. flavipes*, *A. fructus*, *A. pseudodelectus*, *A. terreus* y *A. niger*, contienen un sitio activo que une al peróxido de hidrógeno que reacciona con grupos funcionales específicos en la cadenas poliméricas, la reacción conduce a la formación de radicales libres altamente reactivos, como los radicales hidroxilo (OH), puede causar rompimiento en las cadenas y degradación del polímero, las peroxidosas son efectivas en la degradación oxidativa de polímeros que contienen enlaces químicos sensibles, como anillos aromáticos, cadenas alifáticas o enlaces insaturados, la actividad enzimática puede acelerar la ruptura de estos enlaces, que lleva a la fragmentación del polímero en fragmentos más pequeños, finalmente en moléculas más pequeñas (Nasrabadi et al., 2023).

**Lipasa:** son enzimas que catalizan la hidrólisis de grasa y aceites presentes en bacterias, hongos, plantas y animales, se aplican en la industria alimentaria, farmacéutica y química, los hongos productores de lipasa, como las especies *Aspergillus* se encuentran en diversos materiales contaminados, las lipasas son secretadas por hongos extracelulares que pueden hidrolizar enlaces éster en sustrato mono, di y triglicéridos, las enzimas puede descomponer los desechos grasos y degradar el poliuretano (Nasrabadi et al., 2023).

- **Humedad**

Para la supervivencia de los microorganismos es muy importante el agua (humedad), en un ambiente con alta humedad aumenta la miniaturización del polímero plástico mediante el incremento de la solubilidad y tasa de hidrólisis, permitiendo que la cadena se escinde aún más, facilitando una acción microbiana, teniendo como resultado una mayor biodegradación, por tal motivo el ambiente marino presenta una mayor tasa de degradación por la humedad (Campos, 2021).

- **pH**

El pH, modifica el rendimiento de la reacción de hidrólisis cambiando las condiciones de acidez del ambiente, la hidrólisis es óptima en un pH concreto según el tipo de enzima empleada en el sustrato, el pH se puede cambiar según a los productos de degradación y por el crecimiento microbiano (Campos, 2021).

- **Temperatura**

La temperatura es un factor importante cuanto mayor sea el punto de fusión del polímero, más complicada será la biodegradación debido al decrecimiento de la actividad enzimática con el ascenso de la temperatura, cuando el polímero se encuentra a la temperatura de transición vítrea, es decir cuando el material está cerca de su temperatura de fusión, se mejora la movilidad molecular, acelerando así la degradación enzimática, la termoestabilidad de las enzimas es un objetivo importante que mejora en la mutagénesis, la degradación térmica al peso molecular, reduce la ductilidad y fragmenta el polímero (Campos, 2021).

- **Radiación electromagnética**

La radiación electromagnética es un factor ambiental a considerar, porque algunos plásticos son sensibles debido a que pueden absorber gran parte de la radiación solar, los plásticos tienden a absorber la parte del espectro con alta energía de radiación (radiación UV), que consigue excitar sus electrones otorgándoles una mayor reactividad, capacidad de oxidación y de escisión (Campos, 2021).

- **Tipo de polímero**

El PEBD es el polímero más estudiado seguido por HDPE, poliuretano (PU), y tipos de microplásticos, el polietileno presenta dos tipos: LDPE y HDPE, se han convertido en un material relevante por el impacto que tiene en el ambiente y el amplio uso en la industria, las especies de *Aspergillus sp.* como el *A. niger* es uno de los hongos que puede degradar el PEBD y HDPE utilizando como fuente de carbono (Nasrabadi et al., 2023).

- **Forma y estructura del polímero**

La forma y estructura del polímero es importante para el proceso de biodegradación, si presentan un área de superficie grande (alta relación superficie/volumen) se degradan con más facilidad, pasa lo contrario con los de menor área superficial. Los polímeros presentan una estructura semicristalina que tienen partes amorfas desorganizadas que son atacadas por las enzimas con facilidad, las estables son cristalinas y más recalcitrantes, decimos que el grado de cristalinidad influye en la biodegradación, a medida que la cristalinidad y el número de ramificaciones y cadenas laterales decrecen están menos

empaquetados y más accesibles, un ejemplo es del polímero de PET de baja cristalinidad que se degradan a una velocidad lineal por acción de un poliéster hidrolasa fúngica, las partes cristalinas también son atacadas (Campos, 2021).

- **Peso molecular del polímero**

La movilidad de la cadena molecular, es un indicador en la velocidad de biodegradación, la movilidad de la cadena molecular está determinada por la cantidad de volumen libre que hay en la matriz del polímero, otro factor es la relación de la fase amorfa/cristalina, la ramificación, hay una relación inversa entre las características físicas, el rendimiento de biodegradación del polímero y el rendimiento de la biodegradación conforme a que aumenta la temperatura de fusión, el peso molecular o la cristalinidad del sustrato disminuye la velocidad y la tasa de biodegradación de manera lineal (Campos, 2021).

- **Aditivos y surfactantes**

Los aditivos se utilizan en polímeros como pro oxidantes y pro degradantes, pueden activar, inhibir o catalizar la biodegradación, incluso afectando a los grupos funcionales asimismo a la hidrofiliidad e hidrofobicidad, la adición de aditivos ha elevado la oxidación y la tasa de mineralización. Se utiliza como aditivos: lleno de fibra lignocelulósicas, almidón, ácido palmítico, han aumentado la biodegradación, los plastificantes son aditivos que aceleran la degradación enzimática del PET, los agentes oxidativos como el ácido clorhídrico, el peróxido de hidrógeno, ácido sulfúrico o el ácido nítrico oxidan el polímero adicionando radicales de grupos -OH que mejoran el proceso de degradación (Campos, 2021).

- **Pretratamientos**

De forma natural la erosión y la fotodegradación son los que inician la descomposición del plástico produciendo cambios en las propiedades físicas, químicas y mecánicas, se usan como pretratamiento en las etapas iniciales como la radiación UV y disrupción mecánica producida por ondas después de un periodo los plásticos se fraccionan en microplásticos (<5mm) y nanoplásticos (<0.1µm), también los polímeros de enlaces estables C-C son tratados por la radiación UV, el oxígeno, la temperatura y oxidantes químicos, ayudan en la degradación de compuestos con enlace C-C, la hidrofobicidad del polímero favorece la colonización microbiana y la actividad enzimática (Campos, 2021).

### **2.2.10. Biodegradación de polímeros mediante hongos filamentosos**

Los hongos son de naturaleza robusta y presenta diversas enzimas como celulasas, lacasas, quitinasas, ligninasas, xilinasas, entre otras. Algunos hongos filamentosos de los géneros: *Aspergillus sp.* y *Fusarium sp.*, *Geotrichum sp.*, *Talaromyces sp.* capaces de despolimerización del PET (Hernández, 2021). Los microorganismos excretan enzimas extracelulares capaces de alterar las propiedades físicas y químicas del polietileno, utilizando como fuente de carbono, facilitando los procesos de degradación de plásticos (Cedeño & Merino, 2020).

#### **a. Estructuras somáticas de los hongos**

El cuerpo o tallo están formados por filamentos largos denominados hifas son células unidas, contienen tabiques que las dividen en unidades separadas similar a una célula, las hifas crecen grandes si se rompe una parte puede crecer una hifa nueva, pueden clasificarse en vegetativas, hifas de tipo reproductor (Cedeño & Merino, 2020).

#### **b. Estructuras reproductivas de los hongos filamentosos**

Pueden ser sexuales o asexuales, los conidióforos o esporangióforos son estructuras asexuales que producen propágulos por división o redistribución de núcleos sin fusión nuclear. Los propágulos pueden llamarse conidios o esporas dependiendo del género, las estructuras sexuales como la cleistothecia, perithecia, basidios o cigospongía producen proángulos después de la unión de dos núcleos haploides compatibles. Dependiendo del filo, las esporas sexuales están dentro de sacos denominados ascas (phylum Ascomycota) o son externas (phyla basidiomycota o Zygomycota) (Cedeño & Merino, 2020).

### **2.2.11. Género de hongos con capacidad biodegradadora de polietileno**

#### **a. *Cladosporium sp.***

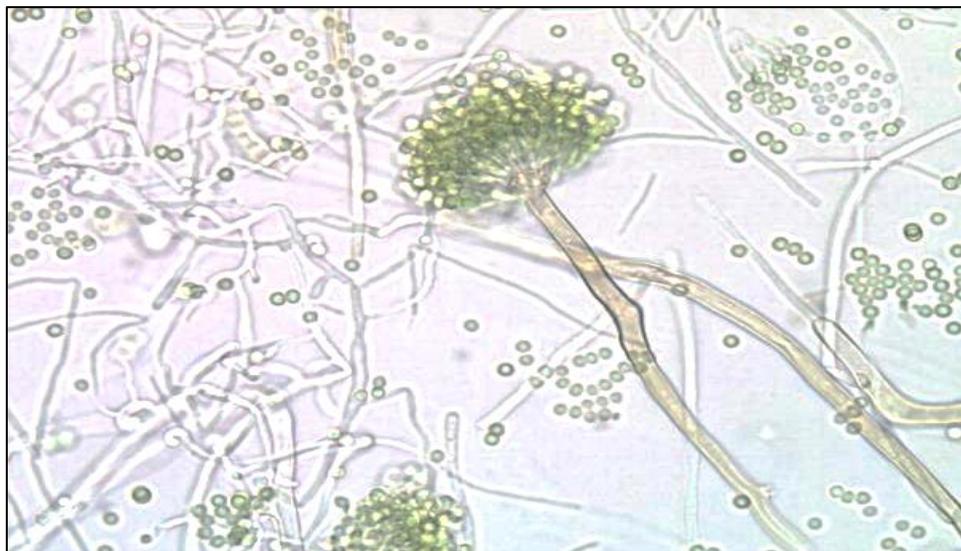
Es un hongo filamentosos, pertenece al filo Ascomycota, grupo de los dematiáceos (presentan una coloración oscura), microscópicamente presenta hifas septadas, finas, ramificadas con color hialino a marrón, esas hifas sostienen cadenas ramificadas de conidios elipsoidales y unicelulares. Macroscópicamente, las colonias presentan un aspecto pulverulento y aterciopelado, con pliegues radiales bien definidos, y un color que varía del blanco o crema a tonos más oscuros como gris, marrón y verde oliva. (Gutiérrez, 2019).

**b. *Penicillium sp.***

Los integrantes de este género son hongos filamentosos y ampliamente distribuidos en la naturaleza y se encuentran en el suelo y aire, con la vegetación caída, así mismo producen micotoxinas patógenas. La identificación según sus características morfológicas tanto macro y microscópicas, al principio son de color blanco y posteriormente son verde azuladas, gris verdosas, gris oliva, amarillentos tienden a rosadas con el tiempo, al reverso es pálido o amarillento (Gutiérrez, 2019).

**2.2.12. *Aspergillus sp.***

La biodegradación mediante el hongo de la familia Aspergillaceae, con 180 especies de las cuales seis son patógenos oportunistas, conocidos por la pudrición blanca de la madera provocando la destrucción de la lignina y polisacáridos, este hongo produce aflatoxinas y es una amenaza para la agricultura y la salud humana, estos hongos son saprofitos en el suelo, infecta cultivos agrícolas causando deterioro a productos alimenticios por ser tóxico, impedir la germinación y causar cambios de color, calentamiento, amohosado, pudren las semillas (Carrillo, 2003), estos hongos tienen la fase de reproducción sexual (Avila & Morán, 2021; Gutiérrez, 2019).



*Figura 3. Observación microscópica del Aspergillus sp.*  
Fuente: Zurita et al., 2017.

Los hongos del género *Aspergillus* (figura 3) son comunes en lugares de putrefacción y por sus características descomponedoras como posible agente reductor de plásticos, para el cultivo del *Aspergillus* se usan agares como el Agar Sabouraud Dextrosa (SDA) (Santacoloma et al., 2019).

**a. Factores que influyen en el crecimiento de *Aspergillus sp.***

- **Medio de cultivo**

El *Aspergillus sp.* se puede cultivar en diferentes medios como: agar papa dextrosa (PDA), agar extracto de malta (MEA), extracto de levadura (YE), caldo czapek dox (CDB), agar sabouraud dextrosa (SDA), sal mineral medio (MSM), el *A. niger* y *A. flavus* crecen en medio como PDA, agar con extracto de malta, caldo czapek dox, SDA, pueden adaptarse metabólicamente, degradar compuestos, pero el PDA es el medio de cultivo (Nasrabadi et al., 2023).

El medio de cultivo es una mezcla de sustancias con o sin gelificación, estos microorganismos tienen diversas características fisiológicas requieren nutrientes para sintetizar (Gonzales, 2019). Pueden crecer sobre Czapek-Levadura es utilizado para crecimiento de hongos, levaduras y bacterias, es un medio sintético que contiene sacarosa, nitrato como única fuente de carbono y nitrógeno, pueden crecer *Aspergillus niger*, Caldo Czapek es un medio de cultivo de hongos capaces de utilizar el nitrato sódico como fuente de nitrógeno, se presenta en forma líquida, sólida donde crece el *Aspergillus spp.* la temperatura de incubación es de 25°C (Carrillo, 2003; Gonzales, 2019).

El cultivo de Sabouraud Dextrosa Agar generalmente es óptima para el crecimiento de hongos filamentosos, en un pH bajo de 5 y 6, este medio contiene peptona, glucosa, agar, dextrosa, cloranfenicol, caseína, péptico, las peptonas son fuentes de nitrógeno, la dextrosa proporciona energía para el crecimiento de microorganismos (Calcetero & Mancera, 2021).

- **pH**

La gran parte de los *Aspergillus spp.* crecen en pH de 4 a 6, solo pocas especies pueden crecer a valores de 7 y 12, el *A. sydowii* pueden crecer en niveles de 4 a 10; prosperando en pH 5, el pH del medio ambiente puede aumentar después de la descomposición biológica, en el momento de elegir el nivel de pH óptimo porque la actividad de las enzimas depende del pH para el crecimiento y

desarrollo, la enzima esterasa exhibió una actividad a pH 7, mientras la enzima lipasa mostró una actividad a pH 5, para biodegradar el plásticos en diversos entornos (Nasrabadi et al., 2023).

- **Temperatura**

El *Aspergillus sp.* prospera en un rango de temperaturas de 25 a 55 °C, el 37.5% de los estudios describe que el *Aspergillus sp.* crece óptimamente a 25 °C, 28 °C, 30 °C, 35 °C y 55 °C, pero el más óptimo es de 37 °C, *A. fumigatus* a 37 °C, *A. flavus* crece en 28 °C a 30 °C (Nasrabadi et al., 2023).

**b. Mecanismos de biodegradación**

Los microorganismos degradan los polímeros hasta mineralizarlos completamente en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, usando mecanismos metabólicos, bioquímicos y enzimáticos, la biodegradación de los polímeros plásticos es observable por la alteración de distintas propiedades superficiales como la reducción de peso o la pérdida de fuerza mecánica y cambios en las propiedades superficiales del plásticos, el objetivo de la biodegradación de plásticos es que estos desechos recalcitrantes se conviertan en compuestos de bajo peso molecular y que sean integrables en los ciclos biogeoquímicos (Campos, 2021).

**c. Etapas**

Según Campos (2021) y Espinoza (2018) existen cuatro etapas en el proceso de biodegradación de polímeros sintéticos como son: la adherencia o biodeterioro, biofragmentación o hidrolisis, asimilación y mineralización. Pero según Bautista-Zamudio et al. (2023) existen cinco etapas del proceso de biodegradación como se observa en la figura 4, primero es la colonización del polímero, segundo es la secreción enzimática extracelular, tercero es la ruptura de la estructura molecular del plástico en pequeñas moléculas, el cuarto es la asimilación de pequeñas moléculas en la célula y por último es la mineralización a través de la B-oxidación o ciclo de Krebs. Son las mismas etapas a excepción de la etapa tres los anteriores autores lo describen dentro de la segunda etapa.

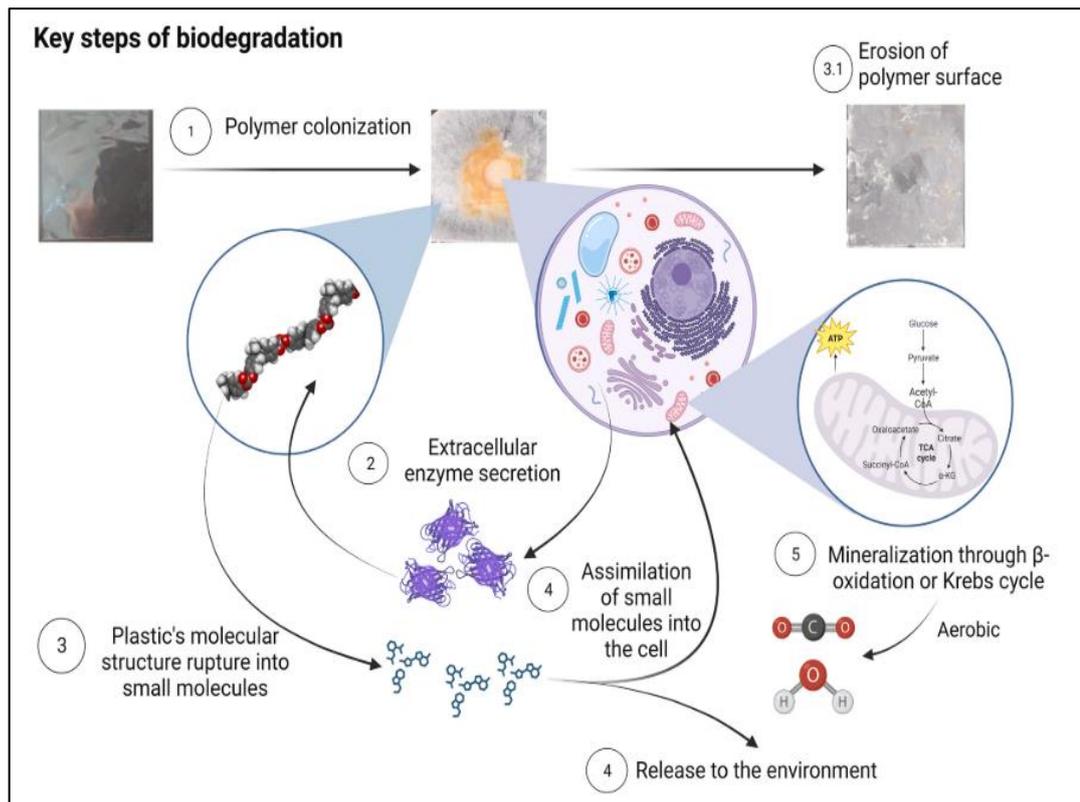


Figura 4. Etapas involucradas en el proceso de biodegradación realizada por hongos del género *Aspergillus*.

Fuente: Bautista-Zamudio et al. (2023).

- **Primera etapa: Colonización del polímero, adherencia o biodeterioro**

En primera instancia, los microorganismos colonizan luego se adhieren a la superficie del polímero (Figura 4), en la interacción se producen proteínas hidrofóbicas que permiten que las estructuras fúngicas se adhieran a la superficie hidrofóbica del polímero (Bautista-Zamudio et al., 2023), con el propósito de reducir la resistencia y durabilidad del plástico, es importante que el plástico sea bioaccesible, muchas veces se introduce grupos funcionales hidrofílicos en la superficie de los polímeros para promover la unión de los microorganismos, los plásticos son muy hidrofóbicas y poco bioaccesibles, pero si existe una exposición a factores ambientales como radiación solar, humedad o temperatura por un tiempo prolongado (Campos, 2021).

El biodeterioro, está marcado por la acción de comunidades microbianas sobre la superficie del plástico, la cual es deteriorada y envejecida, cambiando las propiedades físicas, químicas y mecánicas del polímero (Espinoza, 2018). Los plásticos con superficie hidrofóbica, necesitan la formación biopelículas como el aceite mineral que aumenta la tasa de adherencia, porque el microorganismo

interactuara con la superficie del polímero, mientras que la adición de surfactantes disminuye la formación de biopolímeros. La adherencia del hongo es gracias a las hifas, los exopolisacáridos producidos por algunos microorganismos para aumentar la adherencia de los biofilms, facilitando el intercambio de la interfase hidrofílica o hidrofóbica, que favorece la tasa de adherencia de los microorganismos (Campos, 2021).

- **Segunda etapa: Biofragmentación (hidrólisis), secreción enzimática extracelular**

Una vez que se produce la colonización como se visualiza en la figura 4 etapa dos, los microorganismos comienzan a secretar enzimas extracelulares, estas enzimas se unen al polímero y catalizan su descomposición a través de hidrólisis y oxidación, la biofragmentación afecta de dos formas distintas, reduciendo el peso molecular del polímero, oxidando las moléculas de bajo peso molecular (figura 4 etapa 3), lo que conduce a múltiples rupturas y erosión de la lámina de polímero (Bautista-Zamudio et al., 2023). En el proceso de hidrólisis o despolimerización, los polímeros se transforman en moléculas de bajo peso molecular como monómeros dímeros mediante la acción de exoenzimas y radicales libres, en esta etapa actúan enzimas clasificadas como exoenzimas de los grupos lacasa, peroxidasa, lipasa, esterasa y cutinasa (Campos, 2021).

Las enzimas microbianas hidrolizan principalmente los enlaces glucosídicos, ester y peptídicos mediante ataque nucleofílico, en extremo del polímero (exohidrólisis) o en zona interior (endohidrólisis), teniendo muchos productos, la exohidrólisis genera sustancias como el etilenglicol o el tereftalato, que asimilan microorganismos, mientras endohidrólisis da lugar a oligómeros, aun de elevado peso molecular y seguir degradándose para ser asimilados, se ha demostrado que algunos compuestos inorgánicos como el amoníaco, sulfuro de hidrogeno, algunos ácidos orgánicos como citrato, fumarato o glutarato, favorecen la erosión superficial y la biofragmentación de los polímeros mediante el secuestro de cationes (Campos, 2021; Espinoza, 2018).

- **Tercera etapa: Asimilación**

Los compuestos de bajo peso molecular que se produjeron durante la etapa de biofragmentación, estas moléculas pueden liberarse al ambiente o ingresar a la célula del microorganismo, asimilando en el citoplasma celular, puede ocurrir de forma pasiva o activa, se han descrito diversos transportadores de membrana implicados en la asimilación, diferentes especies tienen transportador específico del tereftalato, se conoce que algunas porinas que permiten la introducción del polietilenglicol, al final los transportadores del tipo ATP, encargados de transportar al citosol oligómeros producidos por la degradación del PE (Bautista-Zamudio et al., 2023; Campos, 2021).

- **Cuarta etapa: Mineralización**

Posterior al ingresar a la célula del microorganismo para mineralizarse a través de la  $\beta$ -oxidación y finalmente dan como resultado dióxido de carbono y agua, como se muestra en la figura 4 etapa cinco (Bautista-Zamudio et al., 2023), se inician las rutas metabólicas degradativas típicas, tanto catabólicas como anabólicas, obteniéndose finalmente una mineralización de los productos hasta formar metabolitos oxidados ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ); o se produce la síntesis de nuevos compuestos útiles para el microorganismo (Campos, 2021; Espinoza, 2018).

En condiciones aeróbicas existen ciertas diferencias en cuanto a las rutas que utilizan los microorganismos para la mineralización completa. Así, por ejemplo, el PE es degradado hasta acetato, el cual se integra en el ciclo de Krebs para formar acetyl-CoA o lípidos, en el caso del PS, cuya unidad monomérica es el estireno, este es oxidado hasta fenilacetato, que ingresa en el ciclo de Krebs siendo mineralizado completamente. Esta molécula es sometida a diversas reacciones enzimáticas hasta metabolizarse completamente, la mineralización completa de los polímeros plásticos ha sido demostrada por distintas técnicas, entre las que se incluyen el rastreo isotópico o la cuantificación del  $\text{CO}_2$  liberado (Campos, 2021).

**d. Características morfológica**

Una característica macroscópica son de color de distintos tonos verde, amarillo, blanco, gris, negro y pardo (Carrillo, 2003), con textura aterciopelada o pulverulenta (Avila & Morán, 2021), por medio del microscopio se puede observar las cabezas conidiales en la Figura 5, donde existen cuatro formas comunes: radiada, globosa,

claviforme o columnar (Torres, 2020), es un género generadora de esporas, desarrolla hifas, conocidas como conidióforos, encima se encuentra las células conidiógenas, originan esporas asexuales o conidios, las características macromorfológicas y micromorfológicas del género *Aspergillus sp.* se detallan en la Tabla 5 (Avila & Morán, 2021).

Por ejemplo el *Aspergillus niger* a las 24 horas, que tiene un crecimiento de micelio de color amarillo y blanco con borde negro, pasadas las 48 h presentan crecimiento de esporas negras, al reverso presento un color verdoso-amarillento con presencia de anillos, la micromorfología las hifas hialinas septadas, conidióforos de cabeza radial, extremos ramificados septadas, conidios y esporas en cadena (Navarro et al., 2021)

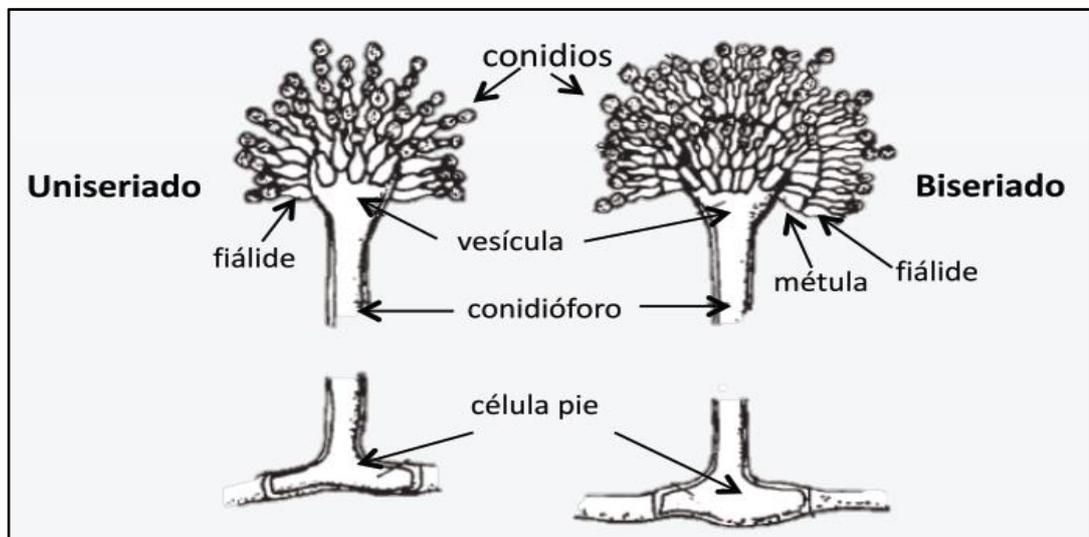


Figura 5. Principales estructuras morfológicas del género *Aspergillus*. Fuente: Organización Panamericana de la Salud (2021).

#### e. Características microbiológicas

La taxonomía de *Aspergillus* comprende 18 grupos, que incluyen 12 especies con potencial patógeno para humanos, cuyas características morfológicas distintivas se resumen en la Tabla 5, doce de ellas causan enfermedades humanas: *Aspergillus fumigatus* 85%, *A. flavus* 5-10%, *A. niger* 2-3%, *A. terreus* 2-3%, *A. versicolor*, *A. nidulans*, *A. glaucus*, *A. clavatus*, *A. cervinus*, *A. candidus*, *A. flavipes* y *A. ustus*, las características morfológicas son el tamaño y forma de las cabezas conidiales, morfología de los conidios, fiálides y métulas, con la presencia de células de Hulle y de esclerocios (Alcalá et al., 1999).

Tabla 5

*Características macromorfológicas y micromorfológicas de hongos del género Aspergillus sp.*

Hongo	Descripción macroscópica	Descripción microscópica
<i>Aspergillus flavus</i>	Anverso: tamaño ilimitado, tiende a cubrir todo el medio. Color: verde paico, amarillento, halo micelial blanco. Forma y aspecto: plana, polvorosa y aterciopelada. Reverso: no presenta pigmentos.	Tipo de micelio: Micelio macrosifonado 2-4 $\mu\text{m}$ septado hialino. Reproducción anamórfica, a base de microconidios redondos de 2-3,5 $\mu\text{m}$ , equinulado. Estructuras, cabeza aspergilar, dos series de estigmas biseriados.
<i>Aspergillus niger</i>	Anverso: ilimitado, tiende a cubrir todo el medio. Color: forma colonia blanca amarillenta en el día 1 y 2, después se convierte a negra. Forma y aspecto: polvoroso. Reverso: no presenta pigmentos.	Tipo de micelio: el micelio nutritivo es macrosifonado 2-4 $\mu\text{m}$ , Reproductivo pocas veces septado e hialino, microconidios redondos de 2-5 $\mu\text{m}$ . Estructura especializada, cabeza aspergilar
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Anverso: tamaño ilimitado, tiende a ocupar todo el medio. Color: verde, con un halo micelial blanco y en ocasiones rosa. Forma y aspectos: plana, polvosa, aterciopelada y seca. Reverso: no presenta pigmentos.	Macrosifonado 2-4 $\mu\text{m}$ , tabicado e hialino. Reproducción microconidios redondos de 2-5 $\mu\text{m}$ . Estructura especializada, cabeza aspergilar mide 30-50 $\mu\text{m}$ . Compuesta por vesícula semirredonda.

Fuente: Gonzales, 2019.

#### f. Identificación

Se realiza a base de características microscópicas y macroscópicas (Tabla 5), se han desarrollado métodos inmunológicos rápidos para su identificación y técnicas moleculares en base al polimorfismo del ADN nuclear y mitocondrial, el polimorfismo de tramos de fragmentos amplificados (AFLP), el polimorfismo de tramos de fragmentos de restricción (RFLP) y el polimorfismo del ADN amplificado al azar (RAPD) para estudios a nivel intraespecífico e interespecífico (Carrillo, 2003).

**g. Métodos de caracterización y análisis de las muestras experimentales**

- **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Es un método de análisis que enfoca un haz de electrones de alta intensidad sobre una muestra sólida para generar una variedad de señales en su superficie, los electrones disparados por el microscopio transportan una cantidad de energía cinética, al momento de desaceleración se disipan por la interacción electrón muestra, los electrones secundarios presentan la información de la morfología y topología de la muestra (Avila & Morán, 2021).

- **Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**

Es un método de análisis químico, es la interacción de la radiación infrarroja con la materia, el espectrofotómetro es un equipo que direcciona un haz de radiación y la porción restante la atraviesa, el espectro infrarrojo de las muestras de polietileno degradadas presentan picos de absorbancia cuando la longitud de onda alcanza los  $1690\text{ cm}^{-1}$  corresponde al modo vibracional de estiramiento del grupo carbonilo, este grupo funcional de polietileno (Avila & Morán, 2021). La región infrarroja IR del espectro electromagnético es de  $4000$  a  $400\text{ cm}^{-1}$  (McMurry, 2008).

- **Interpretación de espectros de infrarrojo**

La interpretación de diferentes estiramientos de enlace y movimiento de doblamiento por docenas de absorciones, la complejidad es útil porque un espectro de IR sirve como una huella digital, la región del espectro IR de  $1500\text{ cm}^{-1}$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ , es denominada región de huella digital, la absorción del C=O de una cetona casi siempre está en el intervalo de  $1680$  a  $1750\text{ cm}^{-1}$ ; la absorción del O-H de un alcohol está en el intervalo de  $3400$  a  $3650\text{ cm}^{-1}$ ; la absorción del C=C de un alqueno se presentan en el intervalo de  $1640$  a  $1680\text{ cm}^{-1}$  como se observa en la Tabla 6 (McMurry, 2008).

Tabla 6

*Absorciones IR características de algunos grupos funcionales*

<b>Grupo funcional</b>	<b>Absorción (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Grupo funcional</b>	<b>Absorción (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Intensidad</b>
Alcano			Amina		
C - H	2850-2960	Media	N-H	3300-3500	Media
Alqueno			C-N	1030-1230	Media
=C-H	3020-3100	Media	Compuesto carbonílico		
C=C	1640-1680	Media	C-O	1670-1780	Fuerte
Alquino			Acido carboxílico		
≡C-H	3300	Fuerte	O-H	2500-3100	Fuerte
C≡C	2100-2260	Media	Nitrilo		
Haluro de alquino			C-N	2210-2260	Media
C-Cl	600-800	Fuerte	Nitro		
C-Br	500-600	Fuerte	NO <sub>2</sub>	1540	Fuerte
Alcohol					
O-H	3400-3650	Fuerte			
C-O	1050-1150	Fuerte			
Areno					
C-H	3030	Débil			
Anillo aromático	1660-2000	Débil			
	1450-1600	Media			

Fuente: McMurry, 2008.

### 2.2.13. Celda transitoria de Huanuyo

Celda es la formación geométrica que se va dar o se le da a los residuos sólidos las cuales son cubiertas por un material que serán compactados por el empleo de maquinaria pesada, el manejo y disposición final de los residuos sólidos está compuesto por cuatro grandes actividades las cuales son: la habilitación, operación, mantenimiento y cierre de la celda, la celda se apertura a raíz de la declaratoria de emergencia en la gestión y manejo de los residuos sólidos en la etapa de disposición final Resolución Ministerial N° 238-2018 MANAM, el manejo de residuos sólidos y disposición final en celda transitoria está compuesto de cuatro actividades: la habilitación, operación, mantenimiento y cierre de celda (Municipalidad Provincial de San Román, 2020).

Los residuos municipales son los que se disponen en la celda transitoria de Huanuyo (Figura 6), de origen domiciliario constituidos por restos de alimentos, papel, botellas, cartón, envases, latas, restos de aseo personal, pañales descartables etc. Así mismos residuos no domiciliarios propias de mercados, centros comerciales,

instituciones, residuos de barrido y limpieza de área pública (Municipalidad Provincial de San Román, 2020).



*Figura 6.* Celda transitoria de Huanuyo.  
Fuente: Municipalidad Provincial de San Román (2020).

#### **2.2.14. Normativa ambiental**

##### **a. La Ley N° 30884**

Esta ley regula el plástico de un solo uso y los recipientes o envases descartables, prohíbe el consumo de aquellos productos de plástico que son innecesarios, es decir, las que no se pueden reciclar o las que pueden representar un riesgo para la salud pública, así como al ambiente (MINAM, 2019).

##### **b. El Decreto Legislativo N° 1278**

Aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, objetivo principal la prevención y minimización de la generación de residuos sólidos frente a cualquier otra alternativa; como segundo objetivo su recuperación y valorización (MINAM, 2019).

## CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. **Ámbito de estudio**

Las cepas fúngicas para el estudio de investigación se aislaron de la celda transitoria de residuos sólidos de la localidad de Huanuyo distrito de Cabanillas, provincia de San Román como se observa en la figura 7, ubicado a una altitud de 3997 m.s.n.m., cuenta con 34 hectáreas de infraestructura para la disposición final de residuos sólidos municipales del distrito de Juliaca y San Miguel, ubicado en la coordenada descrita en la tabla 7 (Ticona, 2023).

Tabla 7

*Ubicación de la celda transitoria de Huanuyo*

Coordenadas UTM		Altura (msnm)
Este (x)	Norte (y)	
334309	8263816	3997

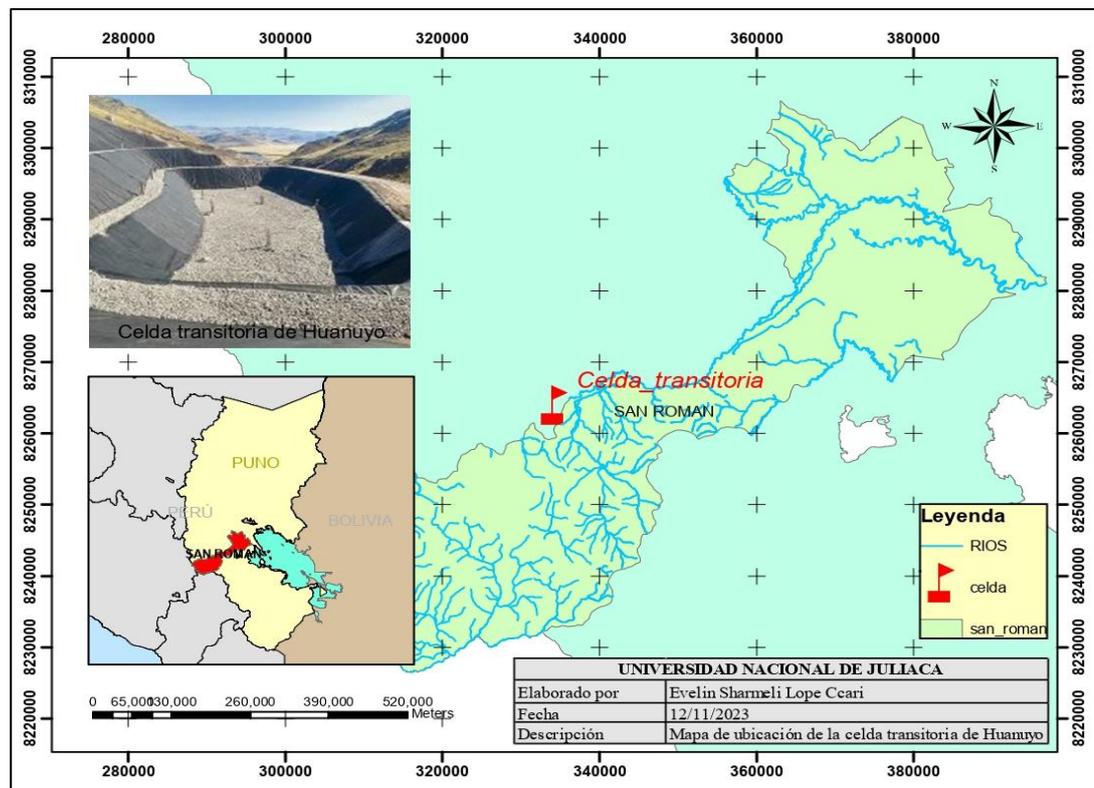


Figura 7. Mapa de ubicación de la celda transitoria de Huanuyo.

Fuente: Arcgis, 2024.

### **3.2. Equipos, materiales, reactivos e insumos**

#### **3.2.1. Equipos**

Autoclave vertical (DAIHAN Scientific), incubadora (memmert), microscopio (Leica DM500), estereoscopio, destilador, balanza analítica capacidad de 220g ABS 220-4N (KERN), cuenta colonias (Kert CM-1), pHmetro portátil, agitador magnético (Vortex), refrigeradora, campana de flujo laminar (Heal Force), cámara fotográfica de celular marca (Remix Note 10), Laptop CORE i5 (acer).

#### **3.2.2. Materiales**

Espátula metálica, mecheros de alcohol cuerpo de vidrio y tapa metálica, hojas de bisturí de N° 10, cubre objetos, porta objetos 25x75mm (CITOPLUS<sup>R</sup>), placas Petri, viales, asa micológica en aro, pinza, luna de reloj, probeta de 100 mL, 243 matraces de 250 mL, 3 vasos precipitados 100 mL, 2 pipetas de 5 mL, fiola de 50 mL, caja de guantes de ensayo (latex), barbijo 3M, mascarillas simples, EPPs, libreta de campo, marcador, cooler, papel de aluminio (bell's), cinta adhesiva tijeras.

#### **3.2.3. Reactivos**

Ácido clorhídrico HCl 1 normal, ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 normal, hidróxido de sodio NaOH 1 normal, azul de lactofenol, buffer, bicarbonato de sodio NaHCO<sub>3</sub> 100g (portugal), solución de KOH 10%, medio de cultivo, Agar dextrosa de Sabouraud Difco 500g.

#### **3.2.4. Insumos**

Agua destilada (destilada en el laboratorio de Biología UNAJ sede Capilla), alcohol 70%, alcohol 96%

### **3.3. Población y tamaño de muestra**

#### **3.3.1. Población**

Se trabajo a nivel laboratorio con muestras representativas de polietileno de baja densidad (un paquete de bolsas de 100 unidades) sin ningún uso obtenidas del mercado San José de la ciudad de Juliaca, para los ensayos de biodegradación se utilizaron matraces de 250 mL.

### 3.3.2. Tamaño de muestra

El tamaño de la muestra estuvo compuesto por 81 unidades experimentales con dos repeticiones que en total sumaría 243 unidades experimentales, cada muestra presenta láminas de polietileno de 1.5 x 1.5 cm.

### 3.3.3. Tipo de investigación

La investigación es de tipo experimental, porque se realiza la manipulación de variables independientes, como temperaturas de 20 °C, 27 °C y 37 °C; volumen del medio de cultivo de 50 mL, 75 mL, 100 mL; pH de 5, 6, 7, por un periodo de tratamiento de 30, 60, 90 días (Taípe & Tovar, 2023).

### 3.3.4. Diseño de investigación

Para el diseño de la investigación se aplicó el diseño factorial de cuatro factores con tres niveles (tabla 8) (Erazo, 2018), (tiempo, temperatura, pH, medio de cultivo), temperaturas de 20, 27 y 37 °C, volumen del medio se usó en la muestra experimental de 50, 75 y 100 mL; pH de 5, 6 y 7, por un periodo de tratamiento de 30, 60, 90 días en las que fueron sometidas las unidades experimentales.

Tabla 8

*Descripción de los factores y niveles*

<b>Factores</b>	<b>Descripción</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel medio</b>	<b>Nivel alto</b>
A	Tiempo	30 días	60 días	90 días
B	Temperatura	20 °C	27 °C	37 °C
C	pH	5	6	7
D	Volumen	50 mL	75 mL	100 mL

En la tabla 9, se decodificaron los niveles en (-1, 0, 1), como se observa los factores tiempo, temperatura, pH y volumen, donde cada factor presenta 3 niveles.

Tabla 9

*Decodificación de los factores y niveles*

<b>Factores</b>	<b>Descripción</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel medio</b>	<b>Nivel alto</b>
A	Tiempo	-1	0	1
B	Temperatura	-1	0	1
C	pH	-1	0	1
D	Volumen	-1	0	1

En la tabla 10, se visualiza el diseño experimental de cuatro factores y tres niveles, donde las unidades experimentales están cultivadas por *Aspergillus sp.* desde el día cero, que colonizaron la superficie de las láminas de PEBD y del medio dentro de los matraces.

Tabla 10

*Diseño experimental con cuatro factores y tres niveles*

Replica	Tiempo (días)	Temperatura (°C)	Medio de cultivo (mL)								
			50			75			100		
			pH								
			5	6	7	5	6	7	5	6	7
I	30	20	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1
		27	-1	1	1	1	0	1	1	-1	-1
		37	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
	60	20	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
		27	1	0	-1	-1	0	1	-1	0	1
		37	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1
	90	20	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
		27	1	-1	-1	-1	0	1	-1	1	1
		37	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1
II	30	20	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1
		27	-1	1	1	1	0	1	1	-1	-1
		37	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
	60	20	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
		27	1	0	-1	-1	0	1	-1	0	1
		37	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1
	90	20	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
		27	1	-1	-1	-1	0	1	-1	1	1
		37	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1
III	30	20	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1
		27	-1	1	1	1	0	1	1	-1	-1
		37	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
	60	20	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
		27	1	0	-1	-1	0	1	-1	0	1
		37	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1
	90	20	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
		27	1	-1	-1	-1	0	1	-1	1	1
		37	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1

La tabla 11, muestra el diseño de análisis de varianza, dado que los datos siguen una distribución normal se consideró la prueba paramétrica ANOVA de tres niveles al tener cuatro factores influyentes en la eficiencia del *Aspergillus sp.*, considerando un nivel de significancia = 0.05 (Castro & Avendaño, 2020).

Tabla 11

*Diseño de análisis de varianza ANOVA*

Fuente	GL	SC	MC Ajust.	Valor F <sub>0</sub>	Valor p
A	a-1	SSA	MSA	$F_A = MSA/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
B	b-1	SSB	MSB	$F_B = MSB/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
C	c-1	SSC	MSC	$F_C = MSC/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
D	d-1	SSD	MSD	$F_D = MSD/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
AB	(a-1)(b-1)	SS(AB)	MS(AB)	$F_{AB} = MS(AB)/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
AC	(a-1)(c-1)	SS(AC)	MS(AC)	$F_{AC} = MS(AC)/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
AD	(a-1)(d-1)	SS(AD)	MS(AD)	$F_{AD} = MS(AD)/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
BC	(b-1)(c-1)	SS(BC)	MS(BC)	$F_{BC} = MS(BC)/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
BD	(b-1)(d-1)	SS(BD)	MS(BD)	$F_{BD} = MS(BD)/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
CD	(c-1)(d-1)	SS(CD)	MS(CD)	$F_{CD} = MS(CD)/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
ABC	(a-1)(b-1)(c-1)	SS(ABC)	MS(ABC)	$F_{ABC} = MS(ABC)/MS_E$	P <sub>(f.)</sub>
ABD	(a-1)(b-1)(d-1)	SS(ABD)	MS(ABD)	$F_{ABD} = MS(ABD)/MS_E$	P <sub>(f.)</sub>
ACD	(a-1)(c-1)(d-1)	SS(ACD)	MS(ACD)	$F_{ACD} = MS(ACD)/MS_E$	P <sub>(f.)</sub>
BCD	(b-1)(c-1)(d-1)	SS(BCD)	MS(BCD)	$F_{BCD} = MS(BCD)/MS_E$	P <sub>(f.)</sub>
ABCD	(a-1)(b-1)(c-1)(d-1)	SS(ABCD)	MS(ABCD)	$F_{ABCD} = MS(ABCD)/MSE$	P <sub>(f.)</sub>
ERROR	abcd(n-1)	SSE			
TOTAL	abcdn-1	SST			

### 3.4. Metodología de la investigación

#### 3.4.1. Aislamiento y caracterización del hongo *Aspergillus sp.* procedentes de la celda transitoria de Huanuyo de la ciudad de Juliaca

##### a. Recolección de la muestra

Para la recolección de la muestra se tomó la metodología de Mostajo y Ambur (2022) los cuales se realizan de forma al azar de cinco puntos elegidos al juicio de experto en distintos lugares de la celda transitoria, primero se determinó las condenadas UTM de los cinco puntos (tabla 12) utilizando el aplicativo GPS, posteriormente se recolectó restos de residuos plásticos y materiales en podredumbre con una muestra total de 2 kilos. Los restos de la muestra fueron colocadas en bolsas ziploc transparentes estériles (Méndez et al., 2007), herméticos para que se mantenga la humedad (Condori, 2020), las muestras se trasladaron a los laboratorios generales de la UNAJ sede la Capilla, por último se refrigeraron por 10 horas, como se observa en el anexo 8.

Tabla 12

*Puntos de muestreo de la celda transitoria*

Puntos de muestreo	Coordenadas UTM		Altura (msnm)
	Este (x)	Norte (y)	
PM-01	334309.30	8263813.871	
PM-02	334309.28	8263816.156	
PM-03	334298.59	8263804.184	3997
PM-04	334296.74	8263802.171	
PM-05	334327.968	8263861.544	

**b. Aislamiento de la cepa y preparación de los materiales**

Para el aislamiento se basó en la metodología de investigación realizada por Mostajo y Ambur (2022), los materiales y la mesa de trabajo se desinfectaron de acuerdo a las normas microbiológicas con agua destilada (destilada en el laboratorio de biología UNAJ), alcohol de 70 y 95%, bicarbonato de sodio 100 g y detergente, se secó la mesa de trabajo con papel absorbente, posteriormente se esterilizó los materiales durante 15 minutos en autoclave a 121°C a una presión de 103 kPa, después se preparó el medio de cultivo agar Sabouraud para el aislamiento del *Aspergillus sp.*

En primera instancia se trasvasó 180 mL de agua destilada con la ayuda de una probeta de 100 mL a un matraz de 250 mL, después se pesó 11.7 g del agar sabouraud en una balanza analítica el cual se añadió al matraz con agua destilada, seguidamente se homogenizó con el apoyo del agitador magnético a 40 rpm por un periodo de 5 min, a continuación se envolvió el cuello del matraz con papel Kraft, previamente se puso un tapón de algodón, luego se autoclavó por una hora a 121°C, tiempo después se retiró del autoclave para incorporar a las 10 placas Petri, finalmente se pusieron a refrigeración (Taipe & Tovar, 2023), todo el proceso se visualiza en el anexo 9.

Pasado 24 h se realizó la siembra de las muestras recolectadas de la celda transitoria en el medio de cultivo sabouraud Difco en placas petri, considerando el procedimiento adecuado microbiológicamente, cada muestra en dos placas haciendo un total de 10, posterior a ello las placas se colocaron a una incubadora a 37 °C por 48 horas y para el aislamiento de la cepa pura se realizaron repiques de los microorganismos aislados de la celda transitoria (anexo 9) (Mostajo & Ambur, 2022).

**c. Identificación del hongo *Aspergillus sp.***

Para la identificación se basó en la investigación de Portella (2019), empleando la técnica del microcultivo que consiste en la siembra del hongo sobre de un trozo del medio sabouraud en un portaobjeto sostenido por un vidrio (pequeño placa Petri) dentro de una placa Petri, incubado a 37 °C por 48 horas, pasado el tiempo se realizó la observación microscópica (figura 9).

También se usó el método de la cinta adhesiva para observar las características microscópicas (Méndez et al., 2007; Torres, 2020), el cual consistió en el uso de un trozo de la cinta adhesiva para extraer hongos de una cepa pura, posteriormente se hizo hecho una gota de lactofenol sobre un porta objetos para la observación en el microscopio. Para la caracterización macroscópica se realizó la comparación con estudios sobre el género *Aspergillus sp.* y el atlas del MINSA (Mostajo & Ambur, 2022).

- **Características macroscópicas**

Se realizó considerando el diámetro de las colonias, coloración del anverso y del reverso de las colonias, presencia de esclerocios, presencia de gotas de exudado, presencia de pigmento difusible, textura de las colonias (Mostajo & Ambur, 2022).

- **Características microscópicas**

Se realizó considerando la disposición de las médulas o fiálides sobre la vesícula, longitud y anchura de los estipes, vesículas, médulas y fiálides, forma, color de los conidios, tamaño y color de las ascosporas (Mostajo & Ambur, 2022).

**3.4.2. Realización de ensayos de biodegradabilidad de polietileno de baja densidad empleando *Aspergillus sp.***

**a. Preparación de cepas aisladas y de los materiales**

Se utilizó la técnica de aislamiento y cultivo establecidas en la investigación de Mostajo y Ambur (2022), las cepas puras aisladas para la caracterización fueron repicadas para el sembrío en las muestras de los ensayos de biodegradabilidad, para esta etapa se emplearon 243 matraces Erlenmeyer de 250 mL que se desinfectaron y autoclavaron, conteniendo el medio de cultivo del agar Sabouraud agar, para la

obtención del pH  $5 \pm 0.2$  se añadió al medio dos a tres gotas de ácido sulfúrico 1 normal con el uso de una micropipeta, así mismo se añadió 2-3 mL de hidróxido de sodio para obtener el pH 6 y  $7 \pm 0.2$ , los medios se refrigeraron por 48 horas a  $-4^{\circ}\text{C}$ .

**b. Preparación y pesado de las láminas de PEBD**

La preparación de las muestras se apoya en el trabajo de investigación de Mostajo (2021), primeramente las muestras fueron fraccionadas en trozos pequeños de 1.5 cm x 1.5 cm, las muestras PEBD sin uso se lavaron con agua destilada y se colocaron en una solución de alcohol de 70% por 60 minutos y nuevamente se volvieron a lavar con agua destilada procesada en el laboratorio de biología UNAJ sede la Capilla. La metodología empleada fue de Arotoma et al. (2021), se realizó el pesaje inicial de las muestras en una balanza analítica, las láminas de muestras de polietileno de baja densidad que fueron de 1.5 cm x 1.5 cm, registrándolas.

**c. Inoculación del *Aspergillus sp.* e introducción de las láminas del PEBD**

Para la inoculación se siguió la metodología de Herrera y Ospina (2019), donde las láminas de PEBD se colocaron en el centro de los matraces con el agar gelificado e inmediatamente se inocularon las cepas del *Aspergillus sp.*, el procedimiento se realizó en una cabina de extracción de gases en el laboratorio de biología de la UNAJ sede la Capilla, concluido el proceso se trasladaron las muestras a los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal sede Ayabacas para ser incubadas en equipos a diferentes temperaturas a  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $27^{\circ}\text{C}$  y  $37^{\circ}\text{C}$  los ensayos de biodegradación se realizaron por 30 días, 60 días y 90 días; pH 5, 6 y 7; en 50 mL, 75 mL y 100 mL.

**d. Determinación de la pérdida de peso**

Después de pasar 30, 60 y 90 días se pesaron las muestras para obtener la pérdida de peso de las láminas sometidas a la acción del hongo *Aspergillus sp.*, para así determinar el porcentaje de la biodegradabilidad, previamente cada lámina de PEBD fué sometida a un tratamiento de limpieza y autoclavado al final del ensayo con agua del laboratorio, alcohol y detergente, que permitió la limpieza profunda del hongo adherido a la superficie de la lámina de PEBD, posteriormente se determinó el peso perdido de cada lamina de PEBD con la ecuación 2 (Santacoloma et al., 2019; Taípe & Tovar, 2023). Para calcular el porcentaje de biodegradación se empleó la ecuación

l que es el peso inicial menos peso final dividido por el peso inicial multiplicado por cien (Choquehuanca & Sandoval, 2023).

$$\text{Peso perdido } (W_p) = W_0 - W_f \quad (2)$$

Donde:

$W_0$ : Peso Inicial

$W_f$ : peso final

$$\% \text{ de biodegradación} = \left( \frac{W_{inicial} - W_{final}}{W_{inicial}} \right) \times 100 \quad (1)$$

**e. Observación microscópica de la lámina del polietileno de baja densidad**

La observación microscópica se realizó a 4x, 10x, 40x y 100x con el uso del microscopio Leica, obteniendo los resultados (figura 8) a 40x, láminas que fueron sometidas a los ensayos de biodegradación a 30 días, 60 días y 90 días, asimismo se realizó la observación del blanco que no fue sometido a ningún tratamiento de biodegradación (Butron, 2020).

**f. Determinación de absorbancia de la biodegradación de polietileno de baja densidad con la técnica de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)**

La espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR), consiste en el hecho de que las moléculas orgánicas absorben determinadas frecuencias en el infrarrojo que caracterizan la estructura, las absorciones son frecuencias de resonancia, se traduce en que la frecuencia de la radiación absorbida coinciden con la frecuencia del enlace o del grupo que vibra, esta técnica denota cuantitativamente la reducción de los índices de carbonilo (C=O) y terminaciones con doble enlace (C=C) de una molécula cuando sufre algún cambio. El espectro infrarrojo se analiza por separado dos zonas referenciales; la primera es llamada la región de los grupos funcionales que va de 1200 a 3600  $\text{cm}^{-1}$  y la segunda denominada región de la huella digital que se despliega desde 600 a 1200  $\text{cm}^{-1}$ ; esta última es una zona muy específica, donde los picos no varían para un polímero, a menos que este haya sufrido el efecto de algún agente químico, físico o biológico (Mostajo & Ambur, 2022), es

por ese motivo que se realizó esta prueba para determinar si la lámina de PEBD ha sufrido algún efecto.

Las muestras fueron enviadas al laboratorio de investigación y servicios con equipos espectroscópicos para la determinación de estructuras químicas UNSA, en el cual analizaron la muestra sometida a los ensayos de biodegradación por 30 días y una muestra que no fue sometida al tratamiento denominada blanco, el método utilizado fue el análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier FT-IR, a un rango de  $650 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ , para realizar el análisis se siguió el lineamiento de las normas ASTM E1252-98 2021 “Standard Practice for General Techiques for Obtaining Infrared for Qualitative Analysis”, en un rango de numero de onda de  $650 \text{ cm}^{-1}$  hasta  $4000 \text{ cm}^{-1}$  y accesorio de reflectancia total atenuada universal.

### 3.4.3. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos de la prueba gravimétrica del polietileno de baja densidad en contacto con el *Aspergillus sp.* se realizó con el software R y el software Minitab (Contreras & Cubas, 2020). La fórmula estadística fue la siguiente (ecuación 3).

$$\begin{aligned}
 y_{ijkl} = & \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} \\
 & + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} \\
 & + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\alpha\gamma\delta)_{ikl} + (\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \mu_{ijkl}
 \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

$Y_{ijkl}$  : Representa la observación correspondiente al nivel i del factor A, nivel j del factor B, nivel k del factor C y el nivel l del factor D.

$\mu$  : Efecto constante denominado media global

$\alpha_i$  : Efecto producido por el nivel i-ésimo del factor A.

$\beta_j$  : Efecto producido por el nivel j-ésimo del factor B.

$\gamma_k$  : Efecto producido por el nivel k-ésimo del factor C.

$\delta_l$  : Efecto producido por el nivel l-ésimo del factor D.

$(\alpha\beta)_{ij}$  : Efecto producido por la interacción entre AxB.

$(\alpha\gamma)_{ik}$  : Efecto producido por la interacción entre AxC.

$(\alpha\delta)_{il}$  : Efecto producido por la interacción entre AxD.

$(\beta\gamma)_{jk}$  : Efecto producido por la interacción entre BxC.

$(\beta\delta)_{jl}$  : Efecto producido por la interacción entre BxD.

$(\gamma\delta)_{kl}$  : Efecto producido por la interacción entre CxD.

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$  : Efecto producido por la interacción entre AxBxC.

$(\alpha\beta\delta)_{ijl}$  : Efecto producido por la interacción entre AxBxD.

$(\beta\gamma\delta)_{jkl}$  : Efecto producido por la interacción entre BxCxD.

$(\alpha\gamma\delta)_{ikl}$  : Efecto producido por la interacción entre AxCxD.

$(\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl}$ : Efecto producido por la interacción entre AxBxCxD.

El factor A representa el tiempo; 30 días, 60 días, 90 días; factor B temperatura; 20 °C, 27 °C y 37 °C, el factor C representa el pH; 5, 6, 7 y factor D representa medio de cultivo; 50 mL, 75 mL, 100 mL.

## CAPÍTULO IV

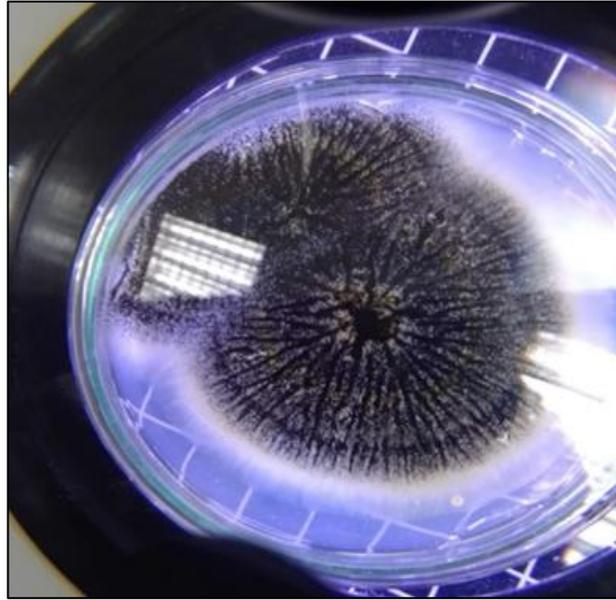
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### **4.1. Aislamiento y caracterización de la cepa *Aspergillus sp.* de la celda transitoria de Huanuyo.**

Para el aislamiento se utilizó el agar sabouraud SDA, que es un medio selectivo para hongos por presentar un pH bajo que impide el crecimiento bacteriano, se inocularon dos cepas de cada muestra de los cuales la cepa MP 03-A, presentó el crecimiento fúngico a diferencia de otras cepas que presentaron crecimientos de levaduras, por tal motivo se realizó el repique de la muestra MP 03-A por presentar similares características morfológicas a los hongos del género *Aspergillus*, posteriormente se observó el crecimiento por 72, 96 y 120 horas a 37 °C de las cuales se eligieron dos cepas para la caracterización macroscópica y microscópica como se observa en las figuras 8 y 9, para la primera se comparó con el Atlas para el diagnóstico micológico del MINSA (Zurita & Urcia, 2017), describiendo sus características generales (forma y color del anverso y reverso) y para la caracterización microscópica se empleó la técnica del microcultivo así como la cinta adhesiva.

##### **4.1.1. Caracterización macroscópica**

El crecimiento del *Aspergillus sp.* en los tres primeros días los micelios fueron de color amarillento, después tornó al color café y finalmente tomó el color negro, colonias granular a flocosas, al reverso de la placa se observó un color blanco amarillento, colonias densas de 7, 4 y 2 cm de diámetros, como se observa en la figura 8, donde observó las características en un contador de colonias, donde se visualizaron tres colonias de *Aspergillus sp.* (Mostajo & Ambur, 2022).



*Figura 8.* Observación macroscópica de cultivos en placas del *Aspergillus sp.*

#### **4.1.2. Caracterización microscópica**

Vesícula biseriada forma esferoidal, cubierto por méticas y fiálides no visibles como se observa en la figura 9, conidióforo o estipe: pared celular gruesa, lisa, hialino, amarillenta, ligeramente café en el ápice, conidios: globosos de color negro, presencia de esporas.



*Figura 9.* Observación microscópica a 100x del *Aspergillus sp.*

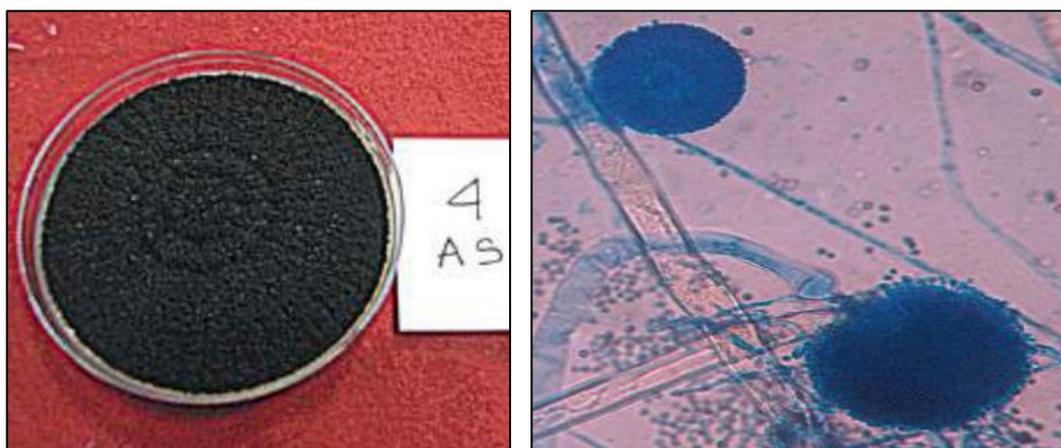


Figura 10. Observación macroscópica y microscópica del cultivo de *Aspergillus niger* en agar Sabouraud del atlas.  
Fuente: Zurita y Urcia (2017).

Los resultados (figura 8) que se obtuvieron en el presente estudio coinciden con algunas características macroscópicas (micelios de color amarillento, después torno al color café y finalmente tomo el color negro, colonias granular a flocosa, al reverso de la placa se observa un color blanco amarillento, colonias densas) y microscópicas (figura 9) (Se observan hifas septadas, conidios largos de color negro o café, de forma radiada y una cabeza aspergilar) característicos del género *Aspergillus*.

Alcalá et al. (1999), describe el *A. fumigatus* que presenta un micelio aterciopelado con un aspecto a polvo de color blanquecino que cambia a verde oscuro o gris y al reverso presenta un color blanco a marrón a rojizo, con conidióforos cortos  $<300\ \mu\text{m}$  y lisos, fiálides uniseriadas sobre el tercio superior de la vesícula, paralelos al eje del conidióforo, así mismo el *A. flavus* presenta un micelio aterciopelado de color amarillo verdoso o marrón, el reverso es de color dorado a marrón rojizo, con conidios de longitud variable y rugosos, fiálides uniseriadas o biseriadas que cubre la vesícula, pero el *A. niger* presenta un micelio lanoso de color blanco amarillento que cambia a negro, reverso blanco amarillento, conidióforos largos y lisos, fiálides biseriadas que cubren la vesícula estas características son muy similares a la especie descritas en el presente estudio.

En el Atlas para el diagnóstico micológico de Zurita y Urcia (2017) indica que los conidios presentan un color negro cultivado en el agar sabouraud glucosado (figura 10), en el resultado de Abarca (2000) indica que las características macroscópicas y microscópicas del *A. niger* van Tieghem, presentan colonias de color negro o marrón oscuro, al reverso presentan un color incoloro a amarillo, colonias densas con textura granular a flocosa, en la observación microscópica presenta cabezas conidiales biseriadas y radicales; vesícula casi esférica, conidios globosos de color marrón. En el estudio de Torres (2020) aisló el *A. niger* en un medio de cultivo PDA a una temperatura de 30 °C pH 6, además observó la formación de cabezas conidiales de forma esférica y globosa, los conidios eran irregulares de color negro café que son similares a los resultados del presente estudio. En el estudio de Navarro et al. (2021) donde caracterizaron el *Aspergillus niger* con macromorfológicas que observo a 24 h, presento un crecimiento de micelio de color amarillo, blanco y borde negro, a las 48 h con un crecimiento de esporas negras sobre toda la caja, al reverso de la caja presento un color verdoso-amarillento con presencia de anillos, las características micromorfológicas observaron hifas hialinas septadas, conidióforos de cabeza radial extremos ramificados septadas, conidios y esporas en cadena.

#### 4.2. Resultados de los ensayos de biodegradabilidad de polietileno de baja densidad empleando *Aspergillus sp.*

Tabla 13

Resultados del porcentaje (%) de biodegradación del PEBD empleando el *Aspergillus sp.*

Replica	Factores	Tiempo (días)	Temperatura (°C)	Medio de cultivo (mL)								
				50			75			100		
				pH								
				5	6	7	5	6	7	5	6	7
I	<i>Aspergillus sp.</i>	30	20	2.05	1.97	1.04	2.15	1.94	1.08	2.14	1.96	1.07
			27	2.79	3.27	1.72	3.13	2.68	2.02	3.28	3.20	2.89
			37	4.40	5.04	3.93	3.48	3.84	2.84	3.94	3.27	3.87
		60	20	2.68	2.64	3.06	3.77	2.84	2.89	3.75	3.33	3.32
			27	3.06	4.17	2.69	3.89	3.45	3.07	4.89	4.97	3.54
			37	4.73	5.47	3.99	4.29	4.65	4.83	6.09	6.30	4.21
		90	20	6.04	5.97	5.85	6.28	5.46	6.56	7.64	7.81	6.51
			27	7.91	7.79	8.30	8.85	7.52	7.71	8.68	7.47	7.86
			37	9.70	9.34	8.12	11.93	10.91	9.32	12.10	11.72	11.05
II	<i>Aspergillus sp.</i>	30	20	2.11	1.96	1.24	2.13	1.96	1.03	2.05	1.89	1.14
			27	3.20	3.98	2.09	2.83	3.07	3.21	2.78	3.28	3.01
			37	4.11	4.11	4.80	3.65	3.26	4.86	3.87	4.55	3.99
		60	20	3.41	4.24	3.00	3.06	2.84	2.83	3.56	3.06	3.00
			27	3.45	4.79	3.51	4.27	3.38	4.43	3.61	3.78	3.86
			37	4.97	6.55	4.75	5.63	4.83	5.64	4.79	4.81	4.64
		90	20	5.63	5.97	5.68	5.79	7.12	6.23	7.17	7.34	7.30
			27	8.83	8.55	7.90	7.90	7.57	7.32	8.90	8.83	6.69
			37	9.97	9.64	8.71	12.27	11.12	9.86	12.13	12.04	10.67
III	<i>Aspergillus sp.</i>	30	20	2.17	1.99	1.09	2.07	1.89	1.14	2.08	1.81	1.02
			27	3.68	3.15	2.89	3.00	3.00	2.94	2.95	2.89	2.40
			37	4.93	5.05	3.00	4.19	2.95	5.37	3.94	4.38	3.63
		60	20	2.90	3.93	2.92	3.20	3.06	3.37	3.07	2.84	3.07
			27	3.67	4.87	3.90	3.36	4.17	4.19	5.24	3.78	3.51
			37	4.73	5.3	4.49	4.30	5.02	5.17	6.03	4.93	4.40
		90	20	6.86	5.77	5.89	5.95	6.06	6.14	8.76	7.60	6.66
			27	8.27	7.71	7.00	8.19	8.61	8.55	8.79	8.51	7.26
			37	10.51	10.63	8.00	12.55	10.20	9.75	12.42	12.87	11.05

En la tabla 13, se muestran los resultados del porcentaje de biodegradación como variable dependiente, sometidos a diferentes variables independientes como: tiempo 30, 60 y 90 días, temperatura 20, 27 y 37 °C, pH 5, 6 y 7, volumen del medio de cultivo 50, 75 y 100 mL, variable fija como las cepas de *Aspergillus sp.* se incubaron en los matraces al inicio del ensayo de biodegradación, además se aprecia las tres replicas con la interacción de los factores en la presencia del *Aspergillus sp.*, de los cuales se observa que el porcentaje de biodegradación muestra que a medida que el tiempo de contacto se prolonga, a una temperatura de 27 °C y 37 °C y en un medio con mayor volumen se obtuvo resultados con mayor porcentaje de biodegradación como 12.87%, 12.55% y 12.42%.

Los resultados con menor eficacia del porcentaje de biodegradación, fueron en los primeros 30 días a 20 °C con 1.02%, 1.03% y 1.04% de biodegradación. El desarrollo del hongo *Aspergillus sp.* fue exponencial hasta los dos meses de incubación, posterior a ello fue decreciente por las variables como la temperatura y el volumen del medio de cultivo, se observó que a una temperatura de 20°C el crecimiento del hongo fue muy lento, tanto que demoró dos semanas en cubrir el medio de cultivo, el desarrollo del *Aspergillus sp.* fue óptimo en temperaturas 27 °C y 37 °C en medios de cultivo de 75 mL y 100 mL.

También se apreció el crecimiento o formación de biopelículas sobre las láminas de PEBD en periodos más prolongados, según Gómez y Oliveros (2016) menciona que el desarrollo de las biopelículas se realizan gracias a conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos, que se consideran como un tratamiento primario para el proceso de biodegradación, obtuvieron 20.86 % para el PEBD que son muy superiores a los resultados obtenidos en la presente investigación, otro factor es la segregación de enzimas dado que Flores y Retamozo (2020) señalan que las enzimas como las lacasas, la peroxidasa de manganeso, ureasa, esterasa, lipasa, proteasa, la ureasa y las peroxidases de lignina, catalizan la biodegradación.

#### **4.2.1. Análisis de los resultados de los ensayos de biodegradación**

Se analizaron los resultados obtenidos por el proceso de biodegradación (tabla 13) efectuados durante 30 días por el *Aspergillus sp.*, el desarrollo en este periodo fue demasiado lento a una temperatura de 20°C a un pH de 5, 6, 7, con volumen del medio de cultivo 50 mL, 75 mL y 100 mL, pero a una temperatura de 27 °C a 37 °C

fue óptima, el 2.17% de biodegradación más sobresaliente a 20°C en un pH 5 y 50 mL, el 3.98% % de biodegradación a 27°C, a pH 6 y a un volumen de 50 mL, el 6.15 % de biodegradación en la réplica III a 37°C, un pH 6 y a 50 mL, siendo el resultado más alto por las condiciones como temperatura y el volumen.

En su estudio Portella (2019) realizó pruebas experimentales de la degradación del PEBD obteniendo el 11.11 % biodegradación para el *Aspergillus japonicus* y el 5.8 % para el *Aspergillus niger*, sometidas a condiciones de laboratorio en 30 días, asimismo Hermoza (2019) demostró que la biodegradación de PEBD mediante el empleo del *Aspergillus brasiliensis* fue de 7% sometido a una temperatura de 22.1 °C y un pH de 7.45 en un periodo de 7 días, que es muy superior a los resultados obtenidos en la investigación.

El pH es una variable importante según Calcetero y Mancera (2021) puesto que su importancia radica en la actividad y el crecimiento de los microorganismos, como las cepas fúngicas del *Aspergillus niger* que se desarrollan en un pH entre 6 a 8, que con el tiempo tienden a crecer en un pH básico, además Bautista-Zamudio et al. (2023) indican que el pH y la temperatura son factores ambientales cruciales para la biodegradación, el pH afecta directamente al desarrollo microbiano y la actividad enzimática, mientras que la temperatura influye en la biodegradación, determinando la ocurrencia y la velocidad de las reacciones que oscilan entre 25 °C y 30 °C.

Taipe y Tovar (2023) en su estudio obtuvieron 23.47% de biodegradación de PEBD a una temperatura ambiente en 30 días, sin embargo, Calcetero y Mancera (2021) en su investigación obtuvieron 4.8421% de biodegradación de PEBD durante 30 días, empleando un sistema de compostaje al que incorporaron inóculo de *Aspergillus sp* a una temperatura de 58 °C, este resultado se asemeja pero el método de biodegradación es distinta.

Pasados 60 días de los ensayos de biodegradabilidad a 20 °C se obtuvieron resultados de 4.24% de biodegradación correspondiente al promedio máximo con un pH 6 y a 50 mL, por otro lado a 27 °C se obtuvo como resultado mayor 6.30% de biodegradación con un pH 6 y a 100 mL, por otra parte a 37°C se obtuvo como resultado 6.55% de biodegradación a un pH 6 y volumen de 50 mL del medio de cultivo, según Portella (2019) en su estudio de 2 meses de *Aspergillus sp1*, a diferentes concentraciones de PEBD como 1(0.01 g), 2(0.025 g), 3(0.05 g), obtuvo

la eficiencia de degradación del 80%, 34.4%, 18%, el *Aspergillus sp2*, a diferentes concentraciones como 1(0.01 g), 2(0.025 g), 3(0.05 g), obtuvo el % de eficiencia de degradación 60%, 50%, 49%, sometidos a condiciones de laboratorio.

En su estudio Torres (2020) obtuvo 6.90% de biodegradación sometidas a temperaturas de 20 °C a 30 °C, lo cual es similar al resultado que se obtuvo en el presente estudio, el cual concluye que medida que el tiempo de biodegradación es mayor y la temperatura es más alta los porcentajes de biodegradación son más eficientes, por otro lado en su estudio DSouza et al. (2021) obtuvieron 26.15% de biodegradación en 55 días. Zhang et al. (2020) describe que las enzimas juegan un papel crucial en el proceso de biodegradación en los hongos como los procesos de despolimerización, asimilación y mineralización, por otro lado en su estudio Espinoza (2018), evaluó el % de degradación de PEBD mediante el *Aspergillus sp.* obteniendo como resultado 0.105% en 60 días y 0.441% en 90 días.

Transcurridos los 90 días de los ensayos de biodegradabilidad a 20 °C se obtuvieron resultados de 8.76 % de biodegradación correspondiente al promedio máximo con un pH de 5 a un volumen 100 mL; a 27 °C se obtuvieron resultados de 8.90% de biodegradación correspondiente al promedio máximo con un pH de 5 y un volumen de 100 mL, mientras que a 37 °C se obtuvieron resultados de 12.87% de biodegradación correspondiente al promedio máximo con un pH de 6 y un volumen de 100 mL, en su estudio Mostajo y Ambur (2022) aislaron varias cepas de *Aspergillus sp.* formando tres grupos, el *Aspergillus fumigatus* con 23.15% de degradación y el *Aspergillus orizae* con 24.13% de degradación, el segundo grupo el *Aspergillus arizae* y el *Aspergillus flavus* con un 16.79 % y 15.69% de degradación, el tercer grupo solo se aisló el *Aspergillus flavus* con 10.43% y 10.24% de degradación a 45 días de prueba obtuvo diferentes resultados de cada especie.

En su investigación Andia y Perez (2020) obtuvieron 58%, 76% y 81% de biodegradación a 20 mL, 30 mL y 40 mL en un periodo de 90 días, por otro lado durante 3 meses y 15 días de ensayos de biodegradación obtuvieron 67%, 74% y 76% con las mismas dosis, humedad de 75% en la cámara de degradación, se presume que estos resultados sean por el tipo de agar que fue el Sabouraud. Los resultados de Santacoloma et al. (2019) quienes utilizaron dos tipos de agar como el agar YGC y el agar Sabouraud Dextrose SDA para el cultivo del *Aspergillus flavus*, en condiciones favorables indican como el mejor el agar YGC con 23.6 % de

disminución de la masa de polietileno, por otra parte en su trabajo Cedeño y Merino (2020) obtuvieron resultados de 5.16% de biodegradación empleando el *Aspergillus sp* en un periodo de 90 días que son similares a los resultados mínimos obtenidos.

#### 4.2.2. Análisis microscópico del polietileno de baja densidad

Mediante una observación microscópica de las muestras del polietileno de baja densidad, se visualizaron algunos cambios en la superficie después de los ensayos de biodegradación (figura 11), donde la muestra correspondiente al ensayo de 90 días presentan líneas cortas formando una especie de grietas pronunciadas a diferencia de la muestra de 30 días de los ensayos de biodegradabilidad, sin embargo en la imagen de 60 días se observaron líneas cortas, además cabe resaltar que la muestra del blanco es una lámina de PEBD que no se sometió a ningún tipo de tratamiento.

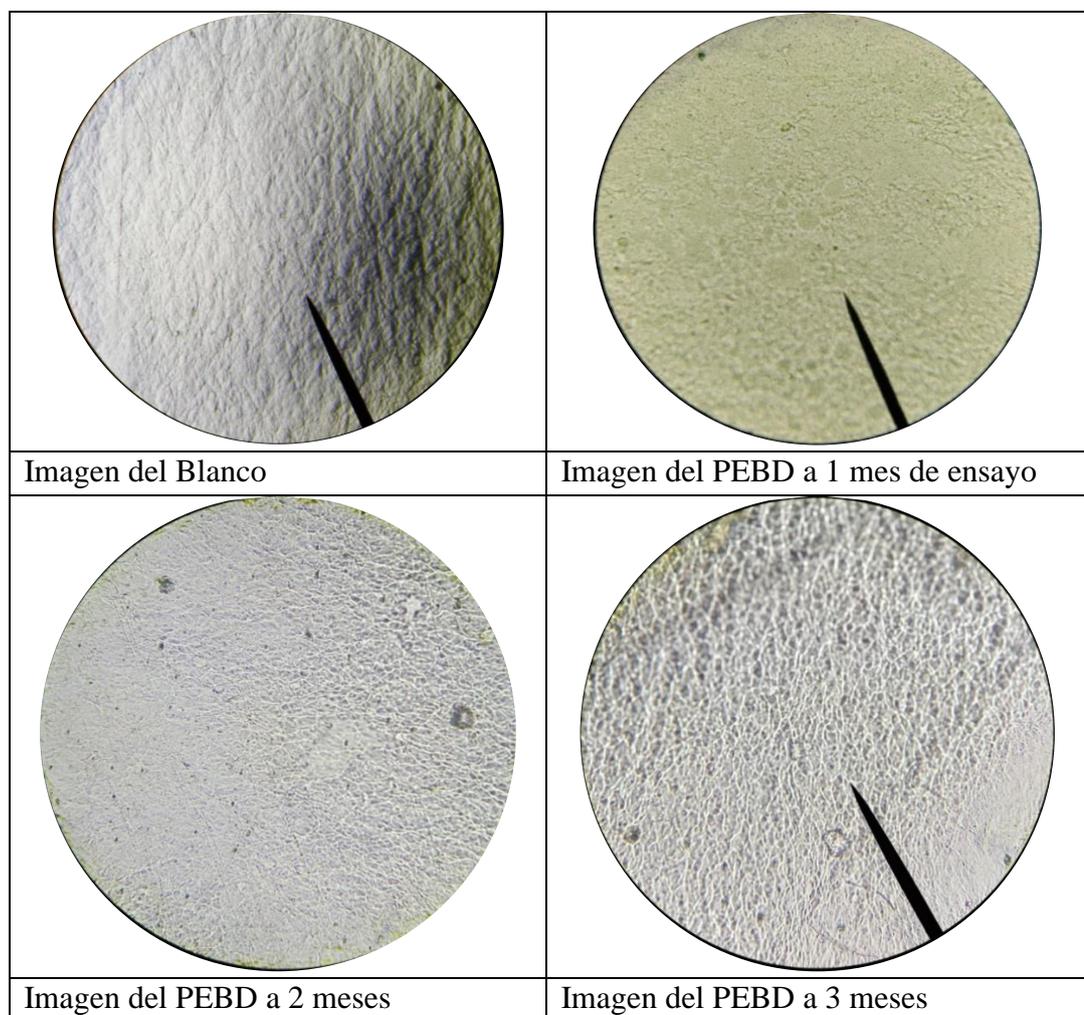


Figura 11. Observación microscópica del polietileno de baja densidad

### 4.2.3. Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

El análisis por FT-IR determina la existencia de cambios en la composición química, formación de grupos funcionales (Espinoza, 2018), cada pico en un espectro de infrarrojo representando un específico tipo de vibración, el espectro es una representación de los estados excitados originados al momento de hacer un barrido en el intervalo de longitud (Mostajo & Ambur, 2022), se realizó el análisis de espectroscopia con la técnica FTIR (figura 12, 13, 14), se observó la absorbancia y transmitancia del polietileno de baja densidad, que fue medido en un rango de onda  $650 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ .

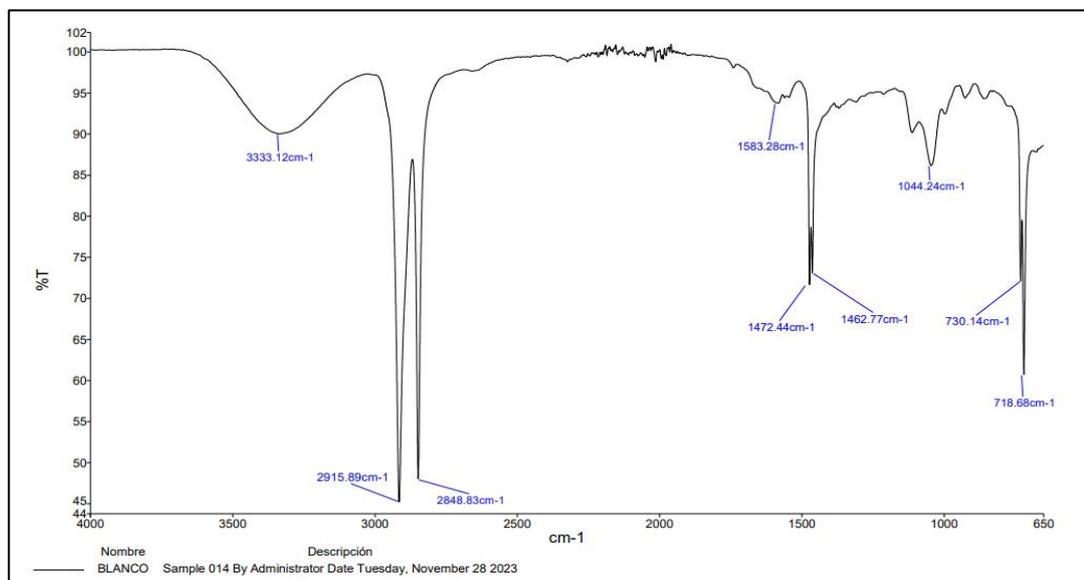


Figura 12. Espectro infrarrojo de las láminas de polietileno de baja densidad sin tratamiento.

En la figura 12 se observan los resultados de rangos de  $2915.89 - 2848.83 \text{ cm}^{-1}$  que corresponde al grupo funcional de alcanos,  $1472.44 - 1462.77 \text{ cm}^{-1}$  que es del grupo funcional del anillo aromático y  $718.68-730.14 \text{ cm}^{-1}$  que corresponde al grupo funcional haluro de alquino C-Cl que es un movimiento de vibración esquelética (McMurry, 2008)

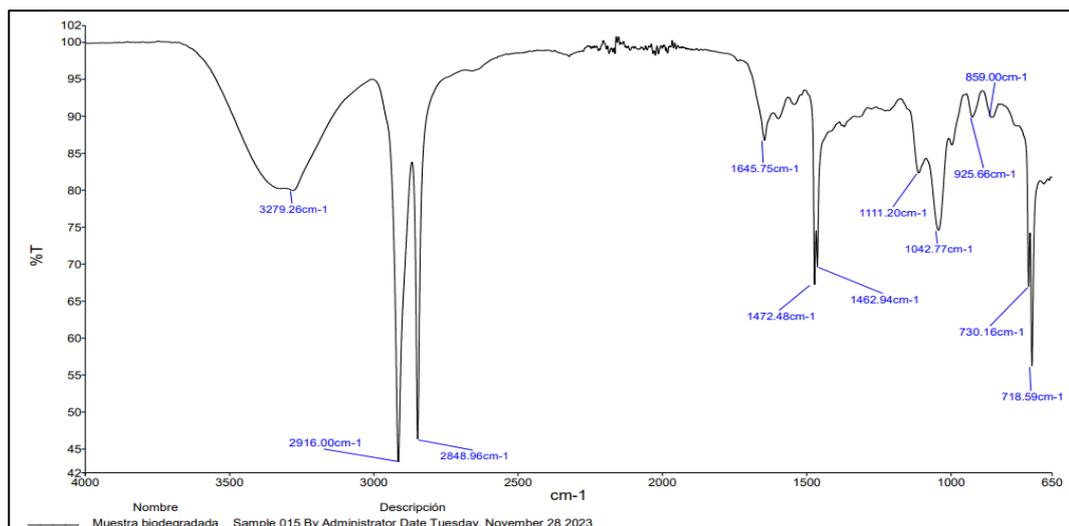


Figura 13. Espectro infrarrojo de las láminas de polietileno de baja densidad con tratamiento de biodegradación.

En la figura 13, los espectros corresponden a la muestra sometidas al tratamiento, con presencia de espectros de  $2916.00\text{ cm}^{-1}$ ,  $2848.98\text{ cm}^{-1}$ ,  $1462.94\text{ cm}^{-1}$ ,  $1472.48\text{ cm}^{-1}$  que evidencia a un movimiento de deformación y  $718.59\text{ cm}^{-1}$  que corresponde al movimiento de vibración esquelética de la estructura del PEBD. También aparecieron nuevos grupos funcionales  $850.00\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al espectro infrarrojo del amino que son componentes básicos de las proteínas

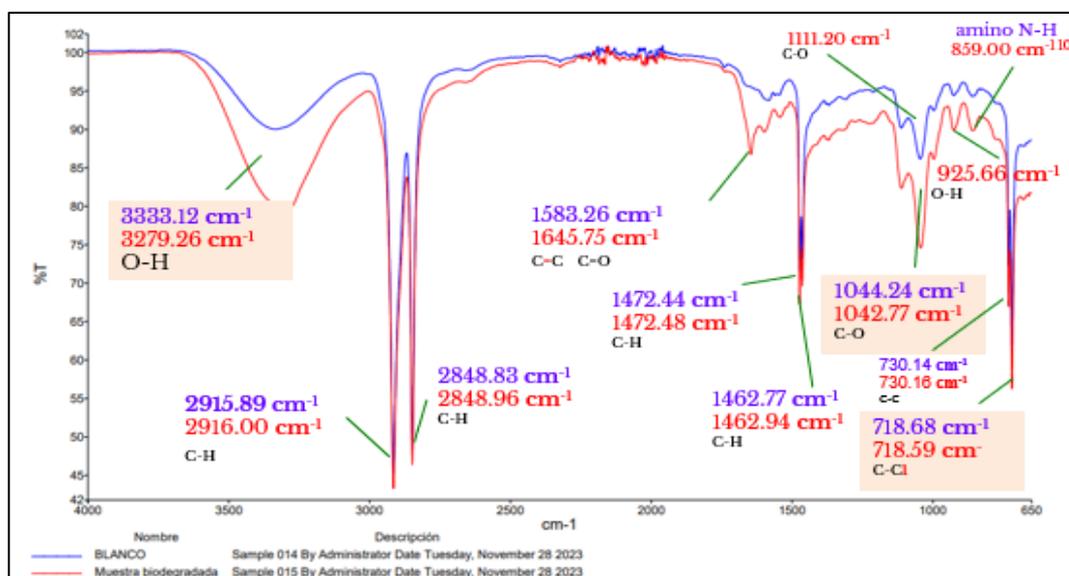


Figura 14. Comparación de los espectros de las láminas de polietileno de baja densidad con tratamiento y sin tratamiento.

En la figura 14 se observa la diferencia de los espectros de estiramiento (C-H alquilo) de la estructura del PEBD 2915.85 - 2916.00  $\text{cm}^{-1}$  de las láminas de la muestra de 90 días, temperatura de 37 °C, pH 6 y un volumen de medio de 100 mL, respecto al blanco, se observa una diferencia de espectros. Asimismo, las técnicas usadas que usaron Flores y Retamozo (2020), como Análisis FTIR y SEM, estas técnicas son indispensables para la observación de la estructura del polímero como su estructura física, química, biológica y los cambios en procesos.

En comparación de FTIR que corresponde a la degradación de láminas polietileno de alta densidad se observó una banda de 1034  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente al enlace -NH- de las aminas, desde 600-1200  $\text{cm}^{-1}$ , zona donde los picos varían por efecto de las cepas de *Aspergillus sp.* indicando que la estructura del polietileno sufrió cambios (Mostajo & Ambur, 2022). En el estudio de Flores y Retamozo (2020), evaluaron la capacidad de microorganismos fúngicos de biodegradación de poliuretano como primera y única fuente de carbono, así como también los cambios en grupos funcionales usando FTIR, el FTIR analiza por zonas la primera zona son los grupos funcionales (1200-3600  $\text{cm}^{-1}$ ) y la segunda es la huella digital (600-1200  $\text{cm}^{-1}$ ) esta región no varía a menos que el polímero presente cambios de un agente químico, físico o biológico (Mostajo & Ambur, 2022),.

En cambio a 453  $\text{cm}^{-1}$  pertenece al enlace de los bromoalcanos, si la banda es 2352  $\text{cm}^{-1}$  corresponde al enlace C-O grupo de los ácidos carboxílicos, estos actúan como cromóforos debido a la UV que inicia una ruptura de las cadenas causando la formación de fragmentos de grupos funcionales como alquenos, alcoholes y ésteres, los cuales son usados por enzimas microbianas para su metabolismo mineralización, indica que si hubo degradación de las láminas de polietileno de baja densidad empleando las cepas de *Aspergillus sp.* (Mostajo & Ambur, 2022)

#### **4.2.4. Análisis estadístico de la investigación**

##### **a. Análisis de Varianza**

Es el análisis estadístico con el cual se estimó los efectos de los factores independientes (tiempo, temperatura, pH y volumen del medio) con respecto al factor dependiente que es el porcentaje de biodegradación del PEBD.

En la tabla 14 podemos observar que cada uno de los valores es el efecto de los factores para describir si son o no significativos, los factores que impactan individualmente son el tiempo, temperatura, pH, volumen porque tienen valores menores al valor de  $p < 0.05$ , en la interacción de dos factores que son significativos son el tiempo\*temperatura y tiempo\*pH y tiempo\*volumen, temperatura\*pH y pH\*volumen, vemos que la interacción de temperatura por volumen no es significativa. En la interacción de 3 factores son el tiempo\*temperatura\*pH y tiempo\*temperatura\*volumen, para la interacción de cuatro factores no es significativo. Los factores más significativos son el tiempo y la temperatura.

Tabla 14

*Resultados del análisis de varianza ANOVA*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	80	1783.67	22.296	93.93	0.000
Lineal	8	1659.28	207.409	873.79	0.000
A	2	1314.41	657.204	2768.73	0.000
B	2	317.53	158.763	668.85	0.000
C	2	7.53	3.764	15.86	0.000
D	2	19.81	9.907	41.74	0.000
Interacciones de 2 términos	24	91.66	3.819	16.09	0.000
A*B	4	59.81	14.953	62.99	0.000
A*C	4	17.07	4.268	17.98	0.000
A*D	4	4.14	1.034	4.36	0.002
B*C	4	2.65	0.661	2.79	0.028
B*D	4	0.59	0.148	0.62	0.646
C*D	4	7.40	1.850	7.79	0.000
Interacciones de 3 términos	32	27.70	0.866	3.65	0.000
A*B*C	8	12.82	1.602	6.75	0.000
A*B*D	8	9.18	1.148	4.84	0.000
A*C*D	8	3.59	0.448	1.89	0.065
B*C*D	8	2.12	0.265	1.11	0.356
Interacciones de 4 términos	16	5.04	0.315	1.33	0.187
A*B*C*D	16	5.04	0.315	1.33	0.187
Error	162	38.45	0.237		
Total	242	1822.12			

### b. Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto (figura 15) nos muestra que los efectos son significativos, la línea roja ayuda determinar si los efectos son significativos o no significativo, los efectos más significativos son los términos: A, AB, AC, B, D son los efectos más significativos y ABC, C, CD, ABD, AD, BC son efectos significativos, por el contrario, los términos ACD, ABCD, BCD, BD que son efectos no significativos, se podría decir que el diagrama de Pareto es el contraste de los resultados de la tabla 14 de varianza.

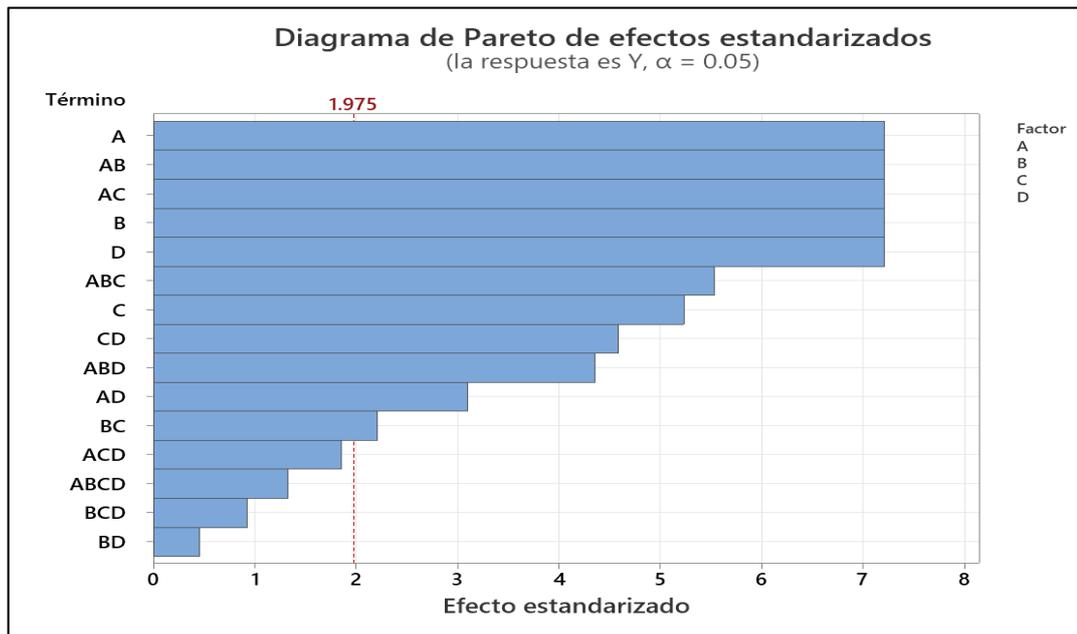


Figura 15. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

### c. Normalidad

La prueba de normalidad verifica si los datos difieren significativamente de una distribución normal como se puede visualizar en la figura 16, podemos concluir que el modelo es de tipo lineal y presenta una distribución normal, también sirve si algún dato es típico, un dato atípico es el valor que está distribuido por debajo de -2 y por encima de 2, viendo nuestra figura 16 ningún dato es atípico.

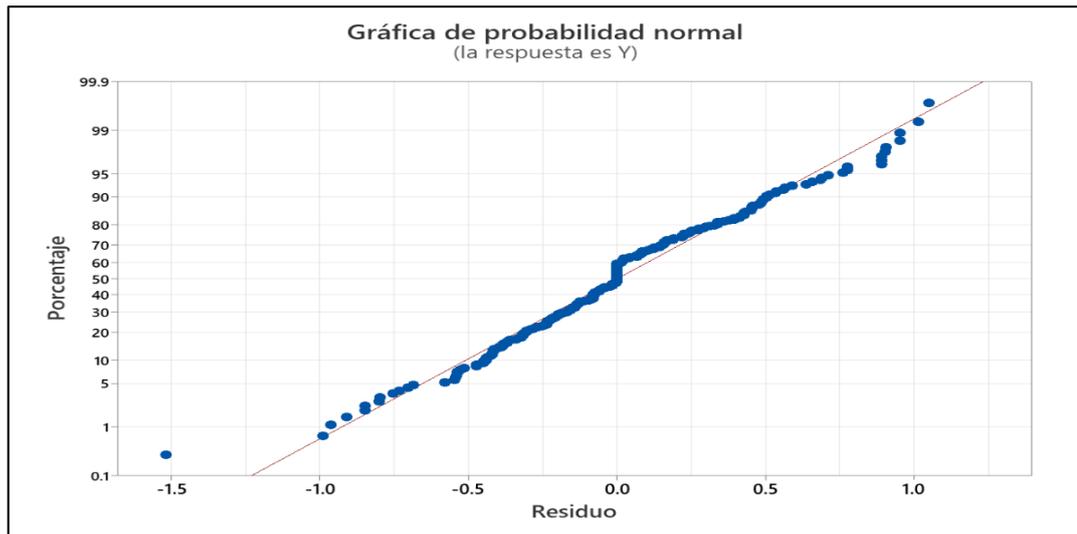


Figura 16. Gráfica de probabilidad normal

#### d. Residuos del modelo de regresión

El residuo es la diferencia entre el valor real de una variable y el valor propuesto por nuestro modelo. Los residuos vs. Ajustes el cual nos indica si el residuo tiene una varianza constante, según la figura 17, la cantidad de puntos que hay sobre la línea es similar a la cantidad de punto debajo de la línea, la diferencia es cerca de 0, la varianza es constante. La figura 18 nos indica si los residuos están correlacionados entre sí, pero en la figura vemos que algunos puntos no están encima del 0 o debajo del 0.

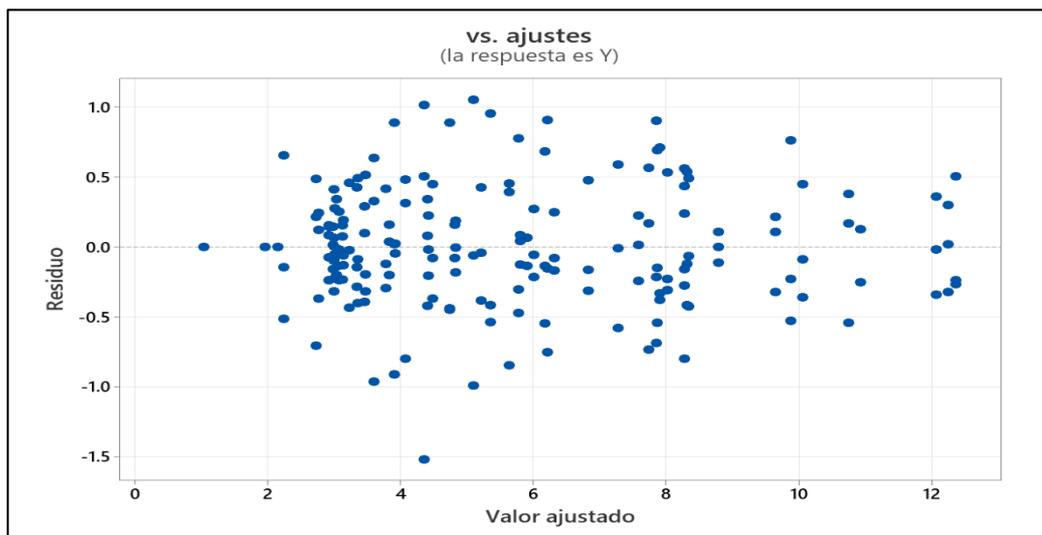


Figura 17. Grafica de residuos vs. ajustes

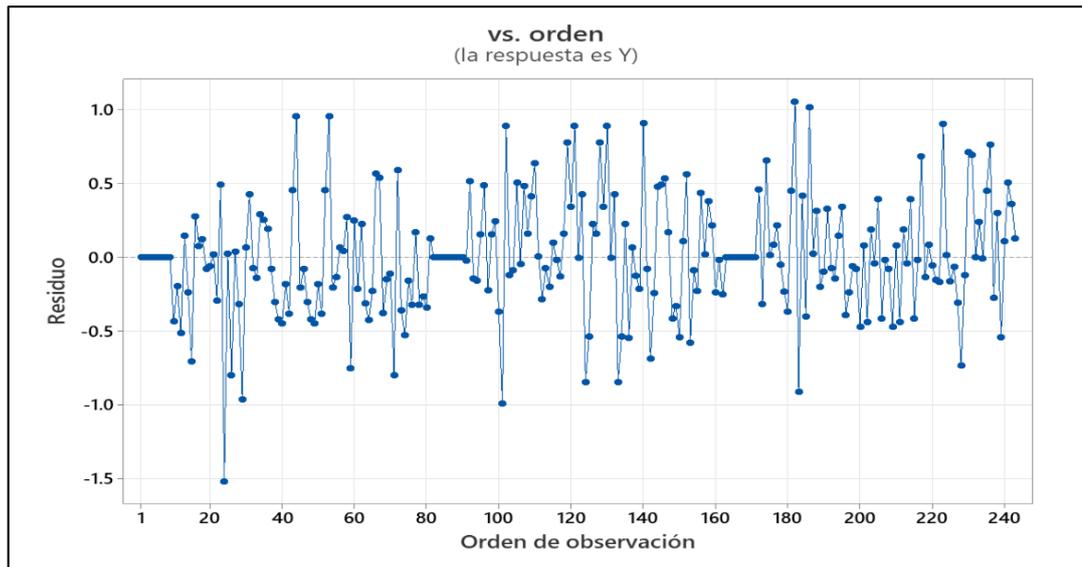


Figura 18. Gráfica de Residuo vs. Orden

**e. Efectos individuales de factores independientes respecto al % de biodegradación**

Podemos observar los efectos positivos del factor A tiempo y del factor B temperatura, se observar (figura 19) que el factor tiempo a 90 días y el % de biodegradación a mayor del 8 %, casi lo mismo sucede en caso del factor B a 37 °C es mayor la biodegradación, pero el factor C existe una relación neutra debido a que los niveles de pH no afectan a la variable dependiente pero se observa que a un pH de 7 es mayor el efecto a la variable dependiente, por último el factor D nos indica que a un volumen de 50 mL es un efecto mayor al factor dependiente.

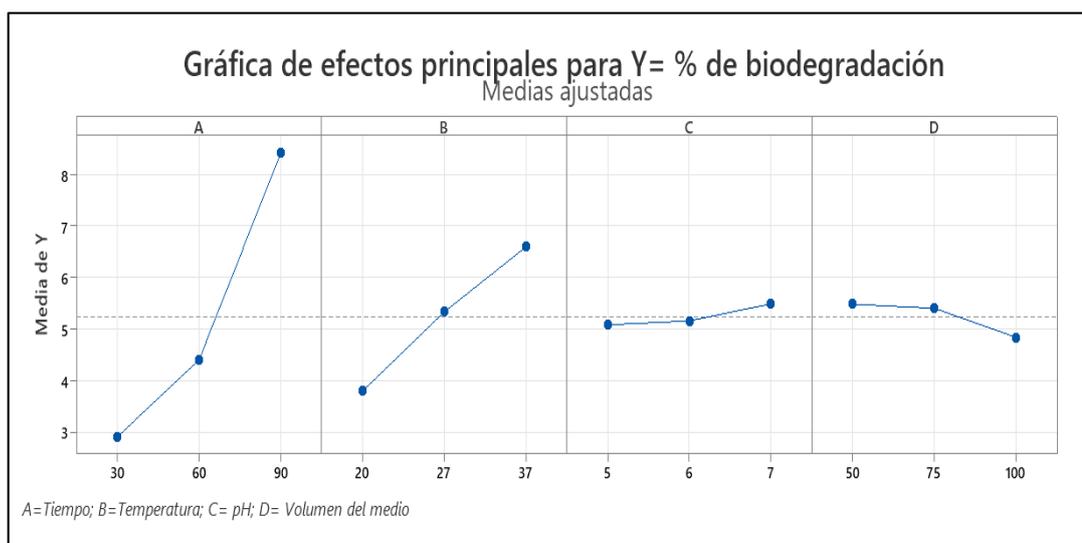


Figura 19. Gráfica de efectos principales para Y= % de biodegradación

**f. Estimación de interacciones**

La figura 20 se muestra la estimación de las interacciones para el factor dependiente Y = % de biodegradación, en el primer cuadrado de las interacciones A\*B nos indica que 30 días a 20 °C se obtuvo la media de Y más baja, a 90 días y con una temperatura de 37° se obtuvo la media de Y más alta, en la interacción de A\*C se observa que, a 30 días sometidas a un pH de 5, 6, 7 da como resultado la media de Y más baja, a 90 días y a un pH de 7 es el resultado más alto de la media de Y. La interacción de A\*D nos indica que a 30 días y a 100 mL es el resultado más bajo, pero a 90 días y a 50 mL es el resultado más alto de la media de Y.

En la interacción de B\*C, se observa que a una temperatura de 20 % y un pH de 6 es el resultado más bajo de la media de Y, a una temperatura de 37 °C y a un pH de 7, se obtuvo el resultado más alto de la media de Y, la interacción de B\*D la mínima fue a 20°C y a 100 mL, el valor mayor de media de Y fue a 37 °C y a 50 mL. La última interacción de C\*D no existe una interacción positiva ni negativa entre el pH 5, 6, 7 y el volumen de 50 mL, 75 mL y 100mL.

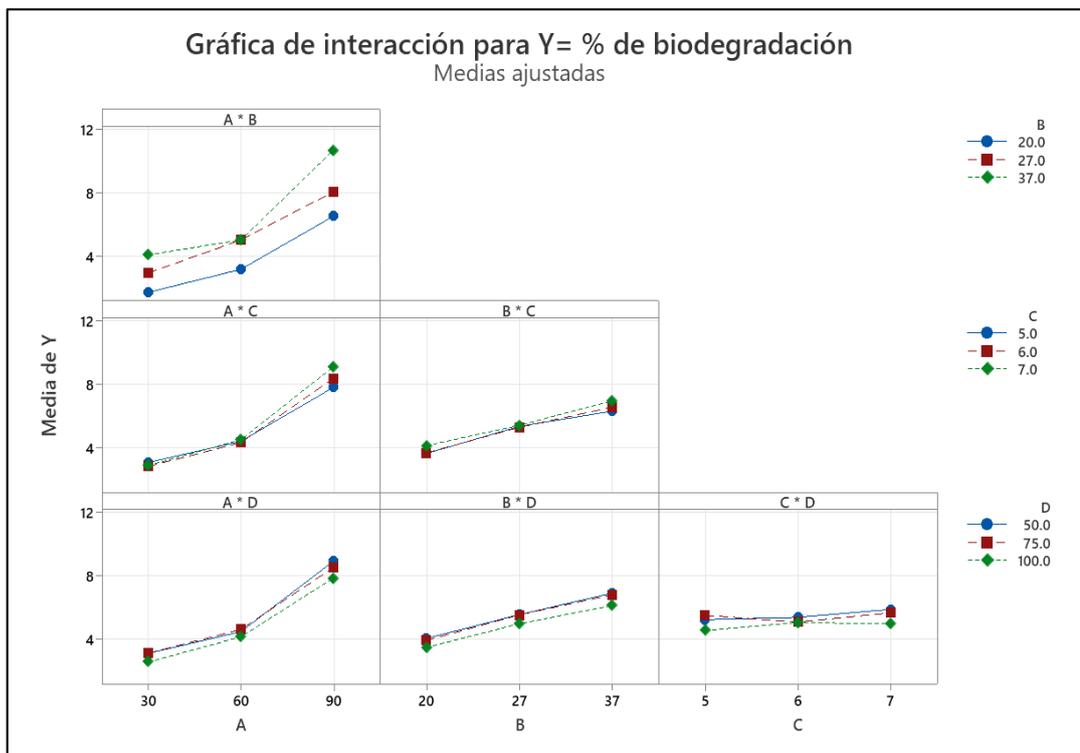


Figura 20. Gráfica de interacción para Y = % de biodegradación

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se aisló la cepa del *Aspergillus sp.* para los ensayos de biodegradación, realizando la caracterización microscópica y macroscópica del *Aspergillus sp.* según las características macroscópicas, presentaron colonias granulosas y esporas del color negro y café, el reverso de un color amarillento pálido, las características microscópicas presentaron hifas septadas, conidios de color negro de forma radiada y una cabeza aspergilar.

Los resultados de los ensayos de biodegradación del PEBD mediante el *Aspergillus sp.* que fueron sometidos a cuatro factores cada uno con tres niveles: tiempo, temperatura, pH y volumen del medio de cultivo, el ensayo de biodegradación a 90 días fue de 12.87 %, 37°C, pH 6 y 100 mL, a 60 días el resultado máximo fue de 6.55 % a un pH de 6, 37 °C, a 30 días fue 5.04 % a un pH de 6, 37°C, en la observación microscópica se apreciaron fisuras y grietas sobre la superficie de las láminas, en el análisis de espectroscopia se observó los espectros de la lámina expuesta al tratamiento respecto al blanco y en la FT-IR demostró espectros de estiramiento  $2915.89\text{ cm}^{-1}$  -  $2916.00\text{ cm}^{-1}$  del grupo alquilo.

## 5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar pretratamientos físicos o químicos a las muestras de PEBD antes de realizar los ensayos de biodegradación para facilitar la oxidación y ruptura de cadenas poliméricas, para luego ser tratados biológicamente por la cepa del hongo *Aspergillus sp.*
- Se sugiere que para las próximas investigaciones se utilice dos niveles como ejemplo temperatura de 14 °C y 27 °C y menor cantidad de muestras.
- Tener en cuenta el factor de la humedad durante el proceso de biodegradación.
- Se recomienda realizar investigaciones con diferentes especies hongos o bacterias con la capacidad de biodegradación de polietileno que ayudara a la minimización de los residuos plásticos que se generan en la ciudad de Juliaca
- Optimizar el tiempo de los ensayos de biodegradación a más de 90 días para alcanzar un porcentaje de biodegradación más elevado.
- Medir el pH durante y después de los ensayos de biodegradación

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, L. (2000). Taxonomía e identificación de especies implicadas en la aspergilosis nosocomial. *Rev Iberoam Micol*, 17, 79–84. <http://www.reviberoammicol.com/2000-17/S79S84.pdf>
- Alcalá, L., Muñoz, P., Peláez, T., & Bouza, E. (1999). *Aspergillus* y aspergilosis. *Control de Calidad SEIMC*, 12(2), 1–5. [http://www.adiveter.com/ftp\\_public/articulo782.pdf](http://www.adiveter.com/ftp_public/articulo782.pdf)
- Andia, Y., & Perez, R. (2020). *Eficiencia de la degradación de fragmentos plástico de polietileno (PEBD) utilizando el hongo Aspergillus tubingensis en suelo agrícola, Lurín – 2020*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/86960>
- Ararat, C. A., & Murillo, E. A. (2016). Polietileno de baja densidad funcionalizado con un poliéster polioliol altamente ramificado maleinizado. *Ingeniería y Ciencia*, 12(23), 127–144. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.23.7>
- Arotoma, F., Apaclla, A., Sánchez, V. G., Saldaña, J. E., & Enríquez, J. D. (2021). Biodegradación del polietileno de baja densidad con *Staphylococcus* sp. aislado del botadero de Ascensión – Huancavelica. *Siglo XXI*, 1, 1–10. <https://revistas.unh.edu.pe/index.php/rscxxi/article/view/21>
- Avila, S., & Morán, H. (2021). *Estudio comparativo de la degradación de polietileno de baja densidad mediada por diferentes especies de hongos como es aspergillus & penicillium*. [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/53527/1/BCIEQ-T-0597-Avila Jaramillo Sheyla Patricia%3B Morán Peñañiel Héctor Eduardo.PDF](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/53527/1/BCIEQ-T-0597-Avila%20Jaramillo%20Sheyla%20Patricia%20Morán%20Peña%20Héctor%20Eduardo.PDF)
- Bautista-Zamudio, P. A. ., Flórez-Restrepo, M. A. ., López-Legarda, X. ., Monroy-Giraldo, L. C. ., & Segura-Sanchez, F. . (2023). Biodegradation of plastics by white-rot fungi: A review. *Science of The Total Environment*, 901, 165950. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165950>
- Butron, S. B. (2020). Capacidad de Biodegradación de *Pseudomonas aeruginosa* frente al polietileno de baja densidad. In *Revista De Investigaciones De La Escuela De Posgrado* (Vol. 9, Issue 3). <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/13475>
- Butrón, S. B. (2022). CAPACIDAD DE BIODEGRADACIÓN DE *Pseudomonas aeruginosa* FRENTE AL POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD. *Revista de Investigaciones*, 9(3), 134–147. <https://doi.org/10.26788/riepg.v9i3.2027>

- Cáceres, O. (2011). *Biodegradación bacteriana de polietileno de baja densidad bajo condiciones controladas en biorreactores Air Life*.  
<http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/356>
- Calcetero, L., & Mancera, J. (2021). *Evaluación del proceso de colonización y degradación de polietileno de baja densidad por inóculo de Aspergillus niger en humus y compostaje doméstico*.
- Campos, M. (2021). *Biodegradación de plásticos convencionales: Estrategias y perspectivas Agradecimientos*.  
<http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/13496/CAMPOS GRANADOS%2C MIGUEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Carrillo, A. C., Daza, L. F., Barraza, Y. C., & Guerrero, Y. (2018). Aislamiento de microorganismos con capacidad degradadora de plásticos del relleno sanitario “los corazones” en la ciudad de Valledupar. *Inndecomm*, 19–28.
- Carrillo, D. M. (2019). *Evaluación de la capacidad del hongo Pleurotus ostreatus en la biodegradación del poliestireno expandido modificado con óxido de zinc*.  
<https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/19676>
- Carrillo, L. (2003). Aspergillus. In *Los hongos de los alimentos y forrajes* (pp. 44–60).  
[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55362329/\\_LEONOR\\_CARRILLO\\_\\_Los\\_Hongos\\_de\\_los\\_Alimentos\\_y\\_FoBookZZ.org-libre.pdf?1514037634=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLEONOR\\_CARRILLO\\_Los\\_Hongos\\_de\\_los\\_Alime.pdf&Expires=1692538876&Signature=GO](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55362329/_LEONOR_CARRILLO__Los_Hongos_de_los_Alimentos_y_FoBookZZ.org-libre.pdf?1514037634=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLEONOR_CARRILLO_Los_Hongos_de_los_Alime.pdf&Expires=1692538876&Signature=GO)
- Castro, A. M., & Avendaño, C. A. (2020). *Determinación del pretratamiento más efectivo sobre el polietileno tereftalato para el aumento en la eficiencia del proceso de degradación realizado por hongos y bacterias autóctonas de lixiviado de relleno sanitario*.
- Ccallo, M., Sacaca, F., Callata, R. A., Vigo, J. E., & Calla, J. (2020). Biodegradación de polímeros de plástico por Pseudomonas. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*. [https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri\\_ctd/index](https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/index)
- Cedeño, J. C., & Merino, J. (2020). *Valoración IN VITRO de la biodegradación de polietileno de baja densidad mediante hongos filamentosos aislados del relleno sanitario de Pichacay*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18821>

- Choquehuanca, Y., & Sandoval, M. (2023). *Biodegradación de bolsas de polietileno (PEBD) por acción del Aspergillus sp y Penicillium sp usando un prototipo de biorreactor airlift*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/138511>
- Churquipa, C. (2018). Contaminación Ambiental y su repercusión en la salud escolar de los estudiantes de la Institución Educativa Primaria N° 70580 de Chilla del distrito de Juliaca. In *Universidad Nacional de San Agustín* (Vol. 0). <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10883><http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4057><http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8014><http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6899>
- Contreras, S., & Cubas, M. (2020). *Biotecnologías bacterianas para la biodegradación de polímeros. Una revisión sistemática y metaanálisis, 2020*. 1–118. [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez\\_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cortolima. (2002). *Guía Para la Selección de. Tecnologías de Manejo Integral de Residuos Sólidos*. 7, 67–118. <https://docplayer.es/13820128-7-algunas-alternativas-tecnologicas-disponibles.html>
- De la cruz, C., & Arone, A. (2020). *Biodegradación de polietileno de baja densidad mediante un consorcio microbiano a condiciones anaerobias y aerobias*. 1–19. [https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3219/Cristina\\_Trabajo\\_Bachiller\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3219/Cristina_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Dilkes-Hoffman, L. S. ., Pratt, S. ., Lant, P. A. ., & Laycock, B. . (2019). The role of biodegradable plastic in solving plastic solid waste accumulation. In *Plastics to Energy: Fuel, Chemicals, and Sustainability Implications* (pp. 469–505). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813140-4.00019-4>
- DSouza, G. C., Sheriff, R. S., Ullanat, V., Shrikrishna, A., Joshi, A. V., Hiremath, L., & Entoori, K. (2021). Fungal biodegradation of low-density polyethylene using consortium of *Aspergillus* species under controlled conditions. *Heliyon*, 7(07008). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07008>
- Erazo, M. (2018). *Evaluación del comportamiento de Aspergillus niger*. [www.esepoch.com](http://www.esepoch.com)
- Escandon, Y. T. (2021). *Evaluación de la capacidad biodegradativa de mascarillas y guantes por especies de hongos del suelo del ex botadero de Marabamba - Huánuco*.

- Espinoza, L. M. (2018). *Evaluación de la degradación de polietileno de baja densidad mediada por diferentes especies de hongos*.  
<https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7410/1/139174.pdf>
- Flores, P. (2020). La problemática del consumo de plásticos durante la pandemia de la covid-19. *South Sustainability, 1*, e016. <https://doi.org/10.21142/ss-0102-2020-016>
- Flores, Y., & Retamozo, O. (2020). Revisión sistemática: Biodegradación del poliuretano utilizando microorganismos fúngicos. In *Repositorio Institucional - UCV*.  
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/49692>
- Gil, C. M. (2020). Medio ambiente, sociedad y plástico: alternativas a las problemáticas de contaminación. In *International Journal of Hypertension* (Vol. 1, Issue 1).  
<http://etd.eprints.ums.ac.id/14871/%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.cell.2017.12.025%0Ahttp://www.depkes.go.id/resources/download/info-terkini/hasil-risikesdas-2018.pdf%0Ahttp://www.who.int/about/licensing/%0Ahttp://jukeunila.com/wp-content/uploads/2016/12/Dea>
- Gómez, J., & Oliveros, C. (2016). Biodegradación de polietileno de tereftalato por microorganismos aislados de sitios de disposición final de residuos sólidos, Táchira, Venezuela Polyethylene terephthalate Biodegra. In *Redieluz* (Vol. 6, Issue 4).  
<https://www.researchgate.net/publication/327944588%0ABIODEGRADACIÓN>
- Gómez, M. J. (2021). Degradación del polietileno por actinobacterias. revisión de la literatura. *Analisis Standar Pelayanan Minimal Pada Instalasi Rawat Jalan Di RSUD Kota Semarang, 3*, 1–36. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/54270>
- Gómez, R. M. (2014). Recuperación de polietileno de baja densidad (LDPE) a partir de empaques tetra pak. In *Journal of Chemical Information and Modeling*.  
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/31126>
- Gonzales, V. C. (2019). Capacidad biodegradativa de hongos filamentosos frente al polietileno. In *Tesis*.  
[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7104/Molleapaza\\_Mamani\\_Joel\\_Neftali.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7104/Molleapaza_Mamani_Joel_Neftali.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gutiérrez, A. (2019). *Biodegradación del polietileno de baja densidad utilizando hongos, bacterias y consorcios microbianos aislados del botadero municipal de Tacna*.  
<http://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/UPT/1269/1/Gutierrez-Alvarez-Ana.pdf>

- Hermida, É. (2011). Guía Didáctica Polímeros. *Colección Materiales y Materias Primas.*, 2, 70. [http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09\\_Polimeros.pdf](http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf)
- Hermoza, A. M. (2019). *Biodegradación microbiana de polietileno de baja densidad, bajo condiciones térmicas controladas en biorreactor air lift, en Santa Clara- Lima 2019.* [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez\\_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Hernández, M. P. (2021). Evaluación de la degradación de pitillos oxo-biodegradables previamente tratados con fotólisis en un sistema de microcosmos, inoculo con *Phanerochaete sp. CMPUJHI23*. In *Jurnal Penelitian Pendidikan Guru Sekolah Dasar* (Vol. 6, Issue August). [https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/59776/Tesis pregrado María Paula Hernández Gómez 2021.pdf?sequence=1](https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/59776/Tesis%20pregrado%20María%20Paula%20Hernández%20Gómez%202021.pdf?sequence=1)
- Herrera, R. A., & Ospina, D. A. (2019). Propuesta de un proceso para el tratamiento biológico del PEBD utilizando bacterias u hongos, a partir de una revisión sistemática. *Universidad Del Bosque*, 1–89. [https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2091/Ospina\\_Mateus\\_Daniela\\_Alejandra\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2091/Ospina_Mateus_Daniela_Alejandra_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Huamaní, C. (2017). Análisis socioeconómico y ambiental del reaprovechamiento y disposición final de los residuos sólidos en la ciudad de Juliaca, San Román, Puno - 2017. In *Universidad nacional del altiplano*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6294>
- Huamaní, C., Tudela, J. W., & Huamaní, A. (2020). Problema Ambiental De Gestión De Residuos Sólidos De La Ciudad De Juliaca-Puno-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 22(1), 106–115. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.541>
- INEI. (2021). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2021*. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1827/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1827/libro.pdf)
- Jaén, M., Esteves, P., & Banos-González, I. (2019). Los futuros maestros ante el problema de la contaminación de los mares por plásticos y el consumo. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias* 16(1), 1501, 13(3), 617–627.

<https://doi.org/10.25267/Rev>

Jubedi S.L. (2019). *LDPE Polietileno baja densidad Descripción*. 1–1.

<https://jubedi.com/wp-content/uploads/2019/09/LDPE-Polietileno-baja-densidad.pdf>

Lara, D. E. (2022, March). ¿Cuál es la situación del plástico de un solo uso? *Blogs Gestión, 2021*, 1–1. <https://gestion.pe/blog/te-lo-cuento-facil/2022/01/cual-es-la-situacion-del-plastico-de-un-solo-uso.html/?ref=gesr>

McMurry, J. (2008). Determinación de la estructura: espectrometría de masas y espectroscopia de infrarrojo. In *Química Orgánica* (pp. 408–439).

[https://materiales.untrefvirtual.edu.ar/documentos\\_extras/20384\\_quimica\\_ii/U10\\_determinacion\\_de\\_la\\_estructura.pdf](https://materiales.untrefvirtual.edu.ar/documentos_extras/20384_quimica_ii/U10_determinacion_de_la_estructura.pdf)

Méndez, C. R., Vergaray, G., Béjar, V. R., & Cárdenas, K. J. (2007). Aislamiento y caracterización de micromicetos biodegradadores de polietileno. *Revista Peruana de Biología, 13*(3), 203–205. <https://doi.org/10.15381/rpb.v13i3.2338>

Mészáros, E., Bodor, A., Kovács, E., Papp, S., Kovács, K., Perei, K., & Feigl, G. (2023). Impacts of Plastics on Plant Development: Recent Advances and Future Research Directions. In *Plants* (Vol. 12, Issue 18). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/plants12183282>

MINAM. (2021). *Consenso nacional sobre Visión y Actuación para enfrentar la basura plástica*. 1–47. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2617362/MINAM\\_sobre\\_PL\\_399-2021-CR\\_Tecnopor\\_15.12.2021\\_%282%29.pdf.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2617362/MINAM_sobre_PL_399-2021-CR_Tecnopor_15.12.2021_%282%29.pdf.pdf)

Mogollón, H., & Sarmiento, L. (2020). Evaluación de la biodegradación microbiana de un empaque plástico comercial de ácido poliláctico por medio de un lodo activo, aspergillus y lodo activo bioaumentado con aspergillus en un medio acuoso aerobio. In *International Journal of Hypertension* (Vol. 1, Issue 1). <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7775/1/6151461-2020-1-IQ.pdf>

Mostajo, M., & Ambur, R. (2022). Efectividad de Aspergillus en la degradación de polietileno. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science, 2*(3), 234–253. <https://doi.org/10.53499/sfjeasv2n3-002>

Mostajo, M. N. (2021). *Efectividad de Micromycetos en la degradación de polietileno*

*aislados de botaderos de la provincia del Cusco- 2018.*

Municipalidad Provincial de San Román. (2020). *Manual de operación y mantenimiento para disposición final de residuos sólidos en celda transitoria Hunauyo.* (Issue 051). <https://bit.ly/3IU5arn-munisanroman>

Nasrabadi, A. E. ., Ramavandi, B. ., & Bonyadi, Z. . (2023). Recent progress in biodegradation of microplastics by *Aspergillus* sp. in aquatic environments. *Colloid and Interface Science Communications*, 57(100754). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colcom.2023.100754>

Navarro, L. G., Collado, L. F., & Hipólito, C. N. (2021). *Hongos y PET : Una Relación de Adaptación.* 13(10), 1844–1850.

Navarro, L. G., Cordero, A. R., Hipólito, C. N., & Collado, L. F. (2022). Degradación química de pet y su metabolismo por consorcios fúngicos: Chemical degradation of pet and its metabolism by fungal consortia DOI: *South Florida Journal of Development*, 3(1), 1492–1506. <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n1-114>

Organización Panamericana de la Salud. (2021). *Identificación de los géneros: Aspergillus, Fusarium y Scedosporium.*

Paredes, E. D. (2023). Modelo De Gestión Ambiental De Residuos Sólidos Urbanos. *Revista de Investigaciones*, 12(1), 43–64. <https://doi.org/10.26788/ri.v12i1.3984>

Paucar, E., & Argote, M. (2018). Acciones Antrópicas E Impacto Socioambiental Del Botadero De Basura En El Centro Poblado De Chilla-Juliaca. *Universidad Nacional Del Altiplano*, 1–113.

Plastics Europe. (2020). Plastics – the Facts 2020. *PlasticEurope*, 1–64. <https://plasticseurope.org/>

Plastics Europe. (2021). Plastics Europe - Enabling a sustainable future. *Plastics Europe Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH.*, 1–34. <https://plasticseurope.org/>

Portella, K. (2019). Determinación de la capacidad degradativa de plásticos por cinco especies de hongos del botadero Muyuna. *Facultad De Zootecnia.* <https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/200/FIA122.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Prada, K. A., & Rojas, D. N. (2020). *Efecto de la radiación ultravioleta (UV) en la capacidad biodegradadora de polietileno de baja densidad (PEBD) con bacterias aisladas de larvas de Galleria mellonella, Chiclayo.*
- Roncacio, K. L. (2016). *Análisis del reciclaje químico como alternativa tecnológica para la valorización y disposición final de residuos plásticos pos-consumo.*
- Sanchez-Hernandez, J. C. (2021). A toxicological perspective of plastic biodegradation by insect larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology*, 248, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2021.109117>
- Sangiorgio, P., Verardi, A., Dimatteo, S., Spagnoletta, A., Moliterni, S., & Errico, S. (2021). Tenebrio molitor in the circular economy: a novel approach for plastic valorisation and PHA biological recovery. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15944-6/Published>
- Santacoloma, S., Buitrago, M. E., Lamus, V., Asprilla, S., Ruíz, J. E., & Villegas, L. C. (2019). Evaluacion De La Biodegradación Del Polietileno, Poliestireno Y Polipropileno Con Aspergillus Flavus. *Scientia et Technica Año XXIV*, 24(03), 532–541.
- SIGERSOL. (2024). *Generacion percapita de los residuos solidos en el distrito de Juliaca.* <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMGVmMGZiYzgtMzkzZi00ZTJILTg1NTYtN2Q0ODRmZWE3OTU5IiwidCI6IjBIMmFiZjRILWExZjUtNDFlZi1iOWE0LWM5YWE2ZGQ1NTE4MCI9&pageName=ReportSection>
- Sotomayor, A., & Power, G. (2019). Tecnologías limpias y medio ambiente en el sector industrial peruano. In *Universidad de Lima* (Primera Ed). Fondo Editorial. <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/9328>
- Taipe, S. R. ., & Tovar, I. A. . (2023). *Evaluación del efecto del medio de cultivo, temperatura y tiempo de contacto en la degradación de polietileno LDPE y PET con el hongo Aspergillus niger.* <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9953>
- Thew, C. X. E., Lee, Z. Sen, Srinophakun, P., & Ooi, C. W. (2023). Recent advances and challenges in sustainable management of plastic waste using biodegradation approach. *Bioresource Technology*, 374. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128772>
- Ticona, J. (2023). *Eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton en el*

- tratamiento de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo-Juliaca 2022.*  
<http://repositorio.unaj.edu.pe:8080/xmlui/handle/UNAJ/256>
- Torres, A. A. (2020). *Efectividad del hongo Aspergillus niger en la biodegradación de polietileno de baja densidad.*  
[https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/50246/Torres\\_HAA - SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/50246/Torres_HAA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Uribe, D., Giraldo, D., Gutiérrez, S., & Merino, F. (2010). Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 133–136.  
<https://doi.org/10.15381/rpb.v17i1.62>
- Urra, V. (2018). *Estación Oceánica para Procesamiento del Residuo Plástico Memoria de Título Proceso 2018.*
- Vargas, G. (2020). *Biodegradación de polietileno mediante el uso de microorganismos.*  
<http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3595>
- Williams, A. T., & Rangel-Buitrago, N. (2022). The past, present, and future of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 176.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113429>
- Wu, W. M., & Criddle, C. (2021). Chapter Five - Characterization of biodegradation of plastics in insect larvae. *Methods in Enzymology*, 648.
- Yao, Z., Seong, H. J., & Jang, Y. S. (2022). Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 242). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113933>
- Yepes, L. M. (2014). *Degradación de Polietileno de Baja Densidad Utilizando Hongos. Revisión Sistemática de la Literatura* (Vol. 1, Issue hal 140).  
<http://www.springer.com/series/15440%0Apapers://ae99785b-2213-416d-aa7e-3a12880cc9b9/Paper/p18311>
- Zambrano, M. J. (2018). *Bacterias aisladas con potencial de degradación de polietileno y sus efectos en suelos contaminados con desperdicios plásticos, Cantón Quevedo, año 2018.*
- Zhang, J., Gao, D., Li, Q., Zhao, Y., Li, L., Lin, H., Bi, Q., & Zhao, Y. (2020).

Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*. *Science of The Total Environment*, 704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135931>

Zurita, S., & Urcia, F. (2017). Atlas para el diagnóstico micológico. In *Instituto Nacional de Salud*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/321033/atlas-micológico-2017-nuevo.pdf>

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de consistencia

Objetivo	Problema	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	Metodología
<p><b>Objetivo general:</b> Evaluar la capacidad de biodegradación de polietileno de baja densidad mediante el empleo del <i>Aspergillus sp.</i> aislada de la celda transitoria de Huanuyo</p> <p><b>Objetivos específicos</b> O1: Aislar y caracterizar la cepa <i>Aspergillus sp.</i> de la celda transitoria de Huanuyo. O2: Realizar ensayos de biodegradabilidad de polietileno de baja densidad empleando <i>Aspergillus sp.</i></p>	<p><b>Problema general:</b> ¿Cuál será la capacidad de biodegradación del polietileno de baja densidad mediante el empleo del <i>Aspergillus sp.</i> aislada de la celda transitoria de Huanuyo?</p> <p><b>Problemas específicos:</b> P1: ¿Se podrá aislar y caracterizar el <i>Aspergillus sp.</i> de la celda transitoria de Huanuyo? P2: ¿Cuál será la eficiencia de biodegradabilidad de polietileno de baja densidad empleando el <i>Aspergillus sp.</i>?</p>	<p><b>Hipótesis general:</b> La cepa de <i>Aspergillus sp.</i> aislada de la celda transitoria de Huanuyo tiene la capacidad para biodegradar polietileno de baja densidad.</p> <p><b>Hipótesis específicas:</b> H1: Dado que en la celda transitoria de Huanuyo se tiene residuos orgánicos, es probable que se pueda aislar la cepa de <i>Aspergillus sp.</i> H2: El <i>Aspergillus sp.</i> reduce el peso de la muestra en los ensayos de biodegradabilidad del polietileno de baja densidad.</p>	<p><b>Variable independiente:</b> Ensayos de biodegradación</p> <p><b>Variable dependiente:</b> Biodegradación de PEBD</p>	<p>Efectividad del hongo <i>Aspergillus sp.</i></p> <p>Masa del polietileno de baja densidad</p>	<p>pH: 5, 6, 7. temperatura: 20°, 27°, 37° C tiempo: 30, 60, 90 días volumen del inóculo: 50, 75, 100 mL</p> <p>Peso inicial del PEBD-peso final del PEBD</p>	<p>Recolección de las muestras aislar el hongo.</p> <p>Ensayos de biodegradación. Análisis de los resultados</p>

Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Ensayos de biodegradación <b>(independiente)</b>	Torres (2020), es un hongo filamentoso ascomiceto que está en todas partes en el medio ambiente y se ha implicado en infecciones oportunistas de humanos y es más conocido por su papel como productor de ácido cítrico,	La efectividad del hongo <i>Aspergillus sp.</i> dependerá de sus características, y a las condiciones que estuvo sometido como a la temperatura, tiempo, pH, volumen del agar	Efectividad del hongo <i>Aspergillus sp.</i> sometido a diferentes condiciones	pH Temperatura Tiempo Volumen del agar	5, 6, 7. 20°, 27°, 37°C. 30, 60, 90 días. 50, 75, 100 mL.
Biodegradación del PEBD <b>(dependiente)</b>	Carrillo (2019), nos dice que la biodegradación es la asimilación por los mismos microorganismos vivos que se alimentan de los polímeros, incluyendo que la asimilación.	La biodegradación del polietileno de baja densidad (PEBD) se medirá mediante el peso inicial y final del PEBD estando en un medio de cultivo, para poder así obtener diferencias en la masa Torres (2020)	Masa del polietileno de baja densidad	Peso inicial del PEBD Peso final del PEBD	Gramos (g)

Anexo 3. Resultados de ensayos de biodegradación del PEBD en 30 días

Tabla 1

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL.*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	2.05	5	20	50
M-2	2.11	5	20	50
M-3	2.17	5	20	50
M-4	1.97	6	20	50
M-5	1.96	6	20	50
M-6	1.99	6	20	50
M-7	1.04	7	20	50
M-8	1.24	7	20	50
M-9	1.09	7	20	50

Tabla 2

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 75mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	2.15	5	20	75
M-2	2.13	5	20	75
M-3	2.07	5	20	75
M-4	1.94	6	20	75
M-5	1.96	6	20	75
M-6	1.89	6	20	75
M-7	1.08	7	20	75
M-8	1.03	7	20	75
M-9	1.14	7	20	75

Tabla 3

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	2.14	5	20	100
M-2	2.05	5	20	100
M-3	2.08	5	20	100
M-4	1.96	6	20	100
M-5	1.89	6	20	100
M-6	1.81	6	20	100
M-7	1.07	7	20	100
M-8	1.14	7	20	100
M-9	1.02	7	20	100

Tabla 4

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	2.79	5	27	50
M-2	3.20	5	27	50
M-3	3.68	5	27	50
M-4	3.27	6	27	50
M-5	3.98	6	27	50
M-6	3.15	6	27	50
M-7	1.72	7	27	50
M-8	2.09	7	27	50
M-9	2.89	7	27	50

Tabla 5

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 75 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	3.13	5	27	75
M-2	2.83	5	27	75
M-3	3.00	5	27	75
M-4	2.68	6	27	75
M-5	3.07	6	27	75
M-6	3.00	6	27	75
M-7	2.02	7	27	75
M-8	3.21	7	27	75
M-9	2.94	7	27	75

Tabla 6

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	3.28	5	27	100
M-2	2.78	5	27	100
M-3	2.95	5	27	100
M-4	3.20	6	27	100
M-5	3.28	6	27	100
M-6	2.89	6	27	100
M-7	2.89	7	27	100
M-8	3.01	7	27	100
M-9	2.40	7	27	100

Tabla 7

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	4.40	5	37	50
M-2	4.11	5	37	50
M-3	4.93	5	37	50
M-4	5.04	6	37	50
M-5	4.11	6	37	50
M-6	6.15	6	37	50
M-7	3.93	7	37	50
M-8	4.80	7	37	50
M-9	3.00	7	37	50

Tabla 8

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 75 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	3.48	5	37	75
M-2	3.65	5	37	75
M-3	4.19	5	37	75
M-4	3.84	6	37	75
M-5	3.26	6	37	75
M-6	2.95	6	37	75
M-7	2.84	7	37	75
M-8	4.86	7	37	75
M-9	5.37	7	37	75

Tabla 9

*Resultados de muestras de 30 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	3.94	5	37	100
M-2	3.87	5	37	100
M-3	3.94	5	37	100
M-4	3.27	6	37	100
M-5	4.55	6	37	100
M-6	4.38	6	37	100
M-7	3.87	7	37	100
M-8	3.99	7	37	100
M-9	3.63	7	37	100

Anexo 4. Resultados de ensayos de biodegradación del PEBD en 60 días

Tabla 10

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	2.68	5	20	50
M-2	3.41	5	20	50
M-3	2.90	5	20	50
M-4	2.64	6	20	50
M-5	4.24	6	20	50
M-6	3.93	6	20	50
M-7	3.06	7	20	50
M-8	3.00	7	20	50
M-9	2.92	7	20	50

Tabla 11

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 75 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	3.77	5	20	75
M-2	3.06	5	20	75
M-3	3.20	5	20	75
M-4	2.84	6	20	75
M-5	2.84	6	20	75
M-6	3.06	6	20	75
M-7	2.89	7	20	75
M-8	2.83	7	20	75
M-9	3.37	7	20	75

Tabla 12

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	3.75	5	20	100
M-2	3.56	5	20	100
M-3	3.07	5	20	100
M-4	3.33	6	20	100
M-5	3.06	6	20	100
M-6	2.84	6	20	100
M-7	3.32	7	20	100
M-8	3.00	7	20	100
M-9	3.07	7	20	100

Tabla 13

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	3.06	5	27	50
M-2	3.45	5	27	50
M-3	3.67	5	27	50
M-4	4.17	6	27	50
M-5	4.79	6	27	50
M-6	4.87	6	27	50
M-7	2.69	7	27	50
M-8	3.51	7	27	50
M-9	3.90	7	27	50

Tabla 14

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 75 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	3.89	5	27	75
M-2	4.27	5	27	75
M-3	3.36	5	27	75
M-4	3.45	6	27	75
M-5	3.38	6	27	75
M-6	4.17	6	27	75
M-7	3.07	7	27	75
M-8	4.75	7	27	75
M-9	4.19	7	27	75

Tabla 15

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	4.89	5	27	100
M-2	3.61	5	27	100
M-3	5.24	5	27	100
M-4	4.97	6	27	100
M-5	3.86	6	27	100
M-6	3.78	6	27	100
M-7	3.54	7	27	100
M-8	3.86	7	27	100
M-9	3.51	7	27	100

Tabla 16

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	4.73	5	37	50
M-2	4.97	5	37	50
M-3	4.73	5	37	50
M-4	5.47	6	37	50
M-5	6.55	6	37	50
M-6	5.3	6	37	50
M-7	3.99	7	37	50
M-8	4.75	7	37	50
M-9	4.49	7	37	50

Tabla 17

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 75 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	4.29	5	37	75
M-2	5.63	5	37	75
M-3	4.3	5	37	75
M-4	4.65	6	37	75
M-5	4.83	6	37	75
M-6	5.02	6	37	75
M-7	4.83	7	37	75
M-8	5.64	7	37	75
M-9	5.17	7	37	75

Tabla 18

*Resultados de muestras de 60 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	6.09	5	37	100
M-2	4.79	5	37	100
M-3	6.03	5	37	100
M-4	6.30	6	37	100
M-5	4.81	6	37	100
M-6	4.93	6	37	100
M-7	4.21	7	37	100
M-8	4.64	7	37	100
M-9	4.4	7	37	100

Anexo 5. Resultados de ensayos de biodegradación en 90 días

Tabla 19

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	6.04	5	20	50
M-2	5.63	5	20	50
M-3	6.86	5	20	50
M-4	5.97	6	20	50
M-5	5.97	6	20	50
M-6	5.77	6	20	50
M-7	5.85	7	20	50
M-8	5.68	7	20	50
M-9	5.89	7	20	50

Tabla 20

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 75 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	6.28	5	20	75
M-2	5.79	5	20	75
M-3	5.95	5	20	75
M-4	5.46	6	20	75
M-5	7.12	6	20	75
M-6	6.06	6	20	75
M-7	6.56	7	20	75
M-8	6.23	7	20	75
M-9	6.14	7	20	75

Tabla 21

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 20 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	7.64	5	20	100
M-2	7.17	5	20	100
M-3	8.76	5	20	100
M-4	7.81	6	20	100
M-5	7.34	6	20	100
M-6	7.60	6	20	100
M-7	6.51	7	20	100
M-8	7.30	7	20	100
M-9	6.66	7	20	100

Tabla 22

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	7.91	5	27	50
M-2	8.83	5	27	50
M-3	8.27	5	27	50
M-4	7.79	6	27	50
M-5	8.55	6	27	50
M-6	7.71	6	27	50
M-7	8.30	7	27	50
M-8	7.90	7	27	50
M-9	7.00	7	27	50

Tabla 23

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 75 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	8.85	5	27	75
M-2	7.90	5	27	75
M-3	8.19	5	27	75
M-4	7.52	6	27	75
M-5	7.57	6	27	75
M-6	8.61	6	27	75
M-7	7.71	7	27	75
M-8	7.32	7	27	75
M-9	8.55	7	27	75

Tabla 24

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 27 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	8.68	5	27	100
M-2	8.90	5	27	100
M-3	8.79	5	27	100
M-4	7.47	6	27	100
M-5	8.83	6	27	100
M-6	8.51	6	27	100
M-7	7.86	7	27	100
M-8	6.69	7	27	100
M-9	7.26	7	27	100

Tabla 25

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 50 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	9.70	5	37	50
M-2	9.97	5	37	50
M-3	10.51	5	37	50
M-4	9.34	6	37	50
M-5	9.64	6	37	50
M-6	10.63	6	37	50
M-7	8.12	7	37	50
M-8	8.71	7	37	50
M-9	8.00	7	37	50

Tabla 26

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 75 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	11.93	5	37	75
M-2	12.27	5	37	75
M-3	12.55	5	37	75
M-4	10.91	6	37	75
M-5	11.12	6	37	75
M-6	10.20	6	37	75
M-7	9.32	7	37	75
M-8	9.86	7	37	75
M-9	9.75	7	37	75

Tabla 27

*Resultados de muestras de 90 días expuestas a una temperatura de 37 °C y un volumen de medio de cultivo de 100 mL*

<b>Muestras</b>	<b>% de biodegradación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Volumen (mL)</b>
M-1	12.10	5	37	100
M-2	12.13	5	37	100
M-3	12.87	5	37	100
M-4	11.72	6	37	100
M-5	12.04	6	37	100
M-6	12.42	6	37	100
M-7	11.05	7	37	100
M-8	10.67	7	37	100
M-9	11.05	7	37	100

Anexo 6. Tablas de resultados de la decodificación de los factores

Tabla 28

*Matriz de decodificación de las variables*

<b>Tiempo</b>	<b>Temperatura</b>	<b>pH</b>	<b>Volumen</b>	<b>% de biodegradación</b>
-1	-1	-1	-1	2.15
-1	-1	0	-1	1.96
-1	-1	1	-1	1.04
-1	-1	-1	0	2.15
-1	-1	0	0	1.96
-1	-1	1	0	1.04
-1	-1	-1	1	2.15
-1	-1	0	1	1.96
-1	-1	1	1	1.04
-1	0	-1	-1	2.79
-1	0	0	-1	3.27
-1	0	1	-1	1.72
-1	0	-1	0	3.13
-1	0	0	0	2.68
-1	0	1	0	2.02
-1	0	-1	1	3.28
-1	0	0	1	3.20
-1	0	1	1	2.89
-1	1	-1	-1	4.40
-1	1	0	-1	5.04
-1	1	1	-1	3.93
-1	1	-1	0	3.48
-1	1	0	0	3.84
-1	1	1	0	2.84
-1	1	-1	1	3.94
-1	1	0	1	3.27
-1	1	1	1	3.87
0	-1	-1	-1	2.68
0	-1	0	-1	2.64
0	-1	1	-1	3.06
0	-1	-1	0	3.77
0	-1	0	0	2.84
0	-1	1	0	2.89
0	-1	-1	1	3.75
0	-1	0	1	3.33

Anexo 6 (continuación)

0	-1	1	1	3.32
0	0	-1	-1	4.73
0	0	0	-1	5.47
0	0	1	-1	3.99
0	0	-1	0	4.29
0	0	0	0	4.65
0	0	1	0	4.83
0	0	-1	1	6.09
0	0	0	1	6.30
0	0	1	1	4.21
0	1	-1	-1	4.73
0	1	0	-1	5.47
0	1	1	-1	3.99
0	1	-1	0	4.29
0	1	0	0	4.65
0	1	1	0	4.83
0	1	-1	1	6.09
0	1	0	1	6.30
0	1	1	1	4.21
1	-1	-1	-1	6.04
1	-1	0	-1	5.97
1	-1	1	-1	5.85
1	-1	-1	0	6.28
1	-1	0	0	5.46
1	-1	1	0	6.56
1	-1	-1	1	7.64
1	-1	0	1	7.81
1	-1	1	1	6.51
1	0	-1	-1	7.91
1	0	0	-1	7.79
1	0	1	-1	8.30
1	0	-1	0	8.85
1	0	0	0	7.52
1	0	1	0	7.71
1	0	-1	1	8.68
1	0	0	1	7.47
1	0	1	1	7.86
1	1	-1	-1	9.70
1	1	0	-1	9.34
1	1	1	-1	8.12
1	1	-1	0	11.93
1	1	0	0	10.91

Anexo 6 (continuación)

1	1	1	0	9.32
1	1	-1	1	12.10
1	1	0	1	11.72
1	1	1	1	11.05
-1	-1	-1	-1	2.15
-1	-1	0	-1	1.96
-1	-1	1	-1	1.04
-1	-1	-1	0	2.15
-1	-1	0	0	1.96
-1	-1	1	0	1.04
-1	-1	-1	1	2.15
-1	-1	0	1	1.96
-1	-1	1	1	1.04
-1	0	-1	-1	3.20
-1	0	0	-1	3.98
-1	0	1	-1	2.09
-1	0	-1	0	2.83
-1	0	0	0	3.07
-1	0	1	0	3.21
-1	0	-1	1	2.78
-1	0	0	1	3.28
-1	0	1	1	3.01
-1	1	-1	-1	4.11
-1	1	0	-1	4.11
-1	1	1	-1	4.80
-1	1	-1	0	3.65
-1	1	0	0	3.26
-1	1	1	0	4.86
-1	1	-1	1	3.87
-1	1	0	1	4.55
-1	1	1	1	3.99
0	-1	-1	-1	3.41
0	-1	0	-1	4.24
0	-1	1	-1	3.00
0	-1	-1	0	3.06
0	-1	0	0	2.84
0	-1	1	0	2.83
0	-1	-1	1	3.56
0	-1	0	1	3.06
0	-1	1	1	3.00
0	0	-1	-1	4.97
0	0	0	-1	6.55
0	0	1	-1	4.75
0	0	-1	0	5.63
0	0	0	0	4.83

Anexo 6 (continuación)

0	0	1	0	5.64
0	0	-1	1	4.79
0	0	0	1	4.81
0	0	1	1	4.64
0	1	-1	-1	4.97
0	1	0	-1	6.55
0	1	1	-1	4.75
0	1	-1	0	5.63
0	1	0	0	4.83
0	1	1	0	5.64
0	1	-1	1	4.79
0	1	0	1	4.81
0	1	1	1	4.64
1	-1	-1	-1	5.63
1	-1	0	-1	5.97
1	-1	1	-1	5.68
1	-1	-1	0	5.79
1	-1	0	0	7.12
1	-1	1	0	6.23
1	-1	-1	1	7.17
1	-1	0	1	7.34
1	-1	1	1	7.30
1	0	-1	-1	8.83
1	0	0	-1	8.55
1	0	1	-1	7.90
1	0	-1	0	7.90
1	0	0	0	7.57
1	0	1	0	7.32
1	0	-1	1	8.90
1	0	0	1	8.83
1	0	1	1	6.69
1	1	-1	-1	9.97
1	1	0	-1	9.64
1	1	1	-1	8.71
1	1	-1	0	12.27
1	1	0	0	11.12
1	1	1	0	9.86
1	1	-1	1	12.13
1	1	0	1	12.04
1	1	1	1	10.67
-1	-1	-1	-1	2.15
-1	-1	0	-1	1.96
-1	-1	1	-1	1.04
-1	-1	-1	0	2.15
-1	-1	0	0	1.96

Anexo 6 (continuación)

-1	-1	1	0	1.04
-1	-1	-1	1	2.15
-1	-1	0	1	1.96
-1	-1	1	1	1.04
-1	0	-1	-1	3.68
-1	0	0	-1	3.15
-1	0	1	-1	2.89
-1	0	-1	0	3.00
-1	0	0	0	3.00
-1	0	1	0	2.94
-1	0	-1	1	2.95
-1	0	0	1	2.89
-1	0	1	1	2.40
-1	1	-1	-1	4.93
-1	1	0	-1	6.15
-1	1	1	-1	3.00
-1	1	-1	0	4.19
-1	1	0	0	2.95
-1	1	1	0	5.37
-1	1	-1	1	3.94
-1	1	0	1	4.38
-1	1	1	1	3.63
0	-1	-1	-1	2.90
0	-1	0	-1	3.93
0	-1	1	-1	2.92
0	-1	-1	0	3.20
0	-1	0	0	3.06
0	-1	1	0	3.37
0	-1	-1	1	3.07
0	-1	0	1	2.84
0	-1	1	1	3.07
0	0	-1	-1	4.73
0	0	0	-1	5.30
0	0	1	-1	4.49
0	0	-1	0	4.30
0	0	0	0	5.02
0	0	1	0	5.17
0	0	-1	1	6.03
0	0	0	1	4.93
0	0	1	1	4.40
0	1	-1	-1	4.73
0	1	0	-1	5.30
0	1	1	-1	4.49
0	1	-1	0	4.30
0	1	0	0	5.02

Anexo 6 (continuación)

0	1	1	0	5.17
0	1	-1	1	6.03
0	1	0	1	4.93
0	1	1	1	4.40
1	-1	-1	-1	6.86
1	-1	0	-1	5.77
1	-1	1	-1	5.89
1	-1	-1	0	5.95
1	-1	0	0	6.06
1	-1	1	0	6.14
1	-1	-1	1	8.76
1	-1	0	1	7.60
1	-1	1	1	6.66
1	0	-1	-1	8.27
1	0	0	-1	7.71
1	0	1	-1	7.00
1	0	-1	0	8.19
1	0	0	0	8.61
1	0	1	0	8.55
1	0	-1	1	8.79
1	0	0	1	8.51
1	0	1	1	7.26
1	1	-1	-1	10.51
1	1	0	-1	10.63
1	1	1	-1	8.00
1	1	-1	0	12.55
1	1	0	0	10.20
1	1	1	0	9.75
1	1	-1	1	12.87
1	1	0	1	12.42
1	1	1	1	11.05

Anexo 7. Informe del ensayo Análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier



**LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS CON  
EQUIPOS ESPECTROSCÓPICOS PARA LA DETERMINACIÓN  
DE ESTRUCTURAS QUÍMICAS**

**(EC-0005-2017-UNSA)**

**INFORME DE ENSAYO**

**ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR  
TRANSFORMADA DE FOURIER**

**Para:** Evelin Sharmeli Lope Ccari

**Aprobado por:** Dra. Adriana Edith Larrea Valdivia

**Analista:** Carlos Javier Valenzuela Huillca

Informe de ensayo No: 174-23			
VERSIÓN	RECEPCIÓN DE MUESTRA	EJECUCIÓN DEL ANÁLISIS	EMISIÓN DE INFORME
1	28-Nov-2023	28-Nov-2023	28-Nov-2023
<b>Descargo de Responsabilidad:</b> Los resultados de los ensayos pertenecen solo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con Normas del Producto o como certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización del LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS CON EQUIPOS ESPECTROSCÓPICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURAS QUÍMICAS (EC-0005-2017-UNSA). Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.			

**TABLA DE CONTENIDO**

1. Introducción.....	3
2. Identificación del investigador .....	3
3. Método utilizado.....	3
4. Condiciones de análisis.....	3
5. Observaciones .....	4
6. Búsqueda en base de datos.....	4
7. Espectros.....	5

## 1. INTRODUCCIÓN

A solicitud de la investigadora Evelin Sharmeli Lope Ccari, se ha realizado el análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, rango medio (MIR), de una muestra. La muestra fue identificada como "BLANCO" y "MUESTRA BIODEGRADADA" y se recibió en consistencia de film, y en cantidad apropiada para el análisis a realizar. La lectura de la muestra fue directamente analizada sobre el accesorio de reflectancia total atenuada UATR.

## 2. IDENTIFICACIÓN DEL INVESTIGADOR

<b>Nombre</b>		
<b>Contacto</b>	Teléfono	-
	Correo electrónico	<a href="mailto:es.lopec@unaj.edu.pe">es.lopec@unaj.edu.pe</a>

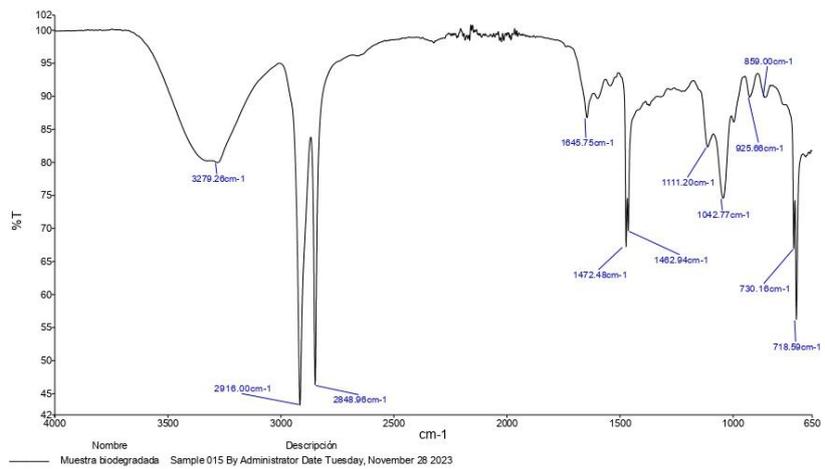
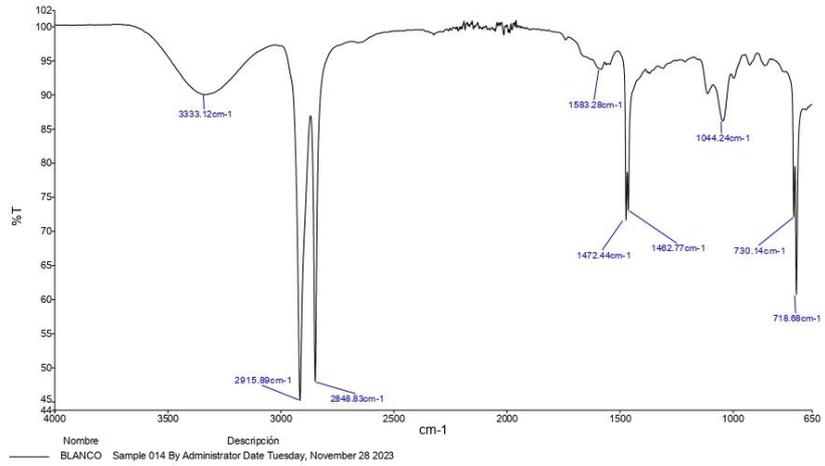
## 3. MÉTODO UTILIZADO

Para la realización del análisis se siguió los lineamientos de la norma ASTM E1252-98 (2021) "Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis", con un rango de número de onda desde 650  $\text{cm}^{-1}$  hasta 4000  $\text{cm}^{-1}$  y accesorio de reflectancia total atenuada universal.

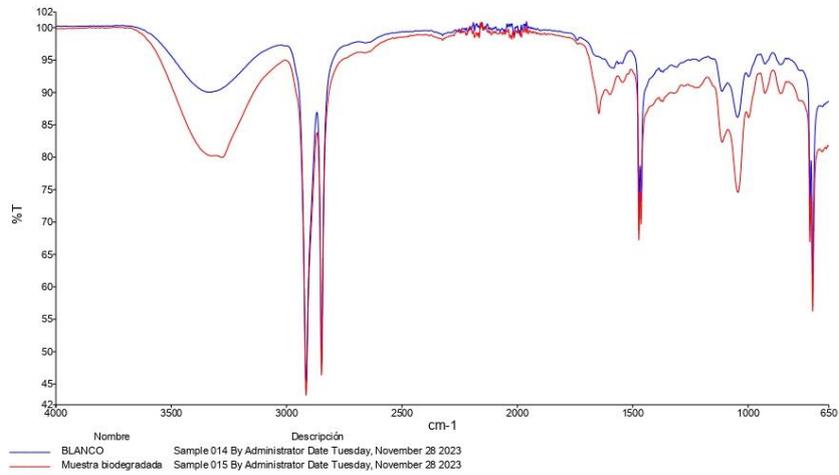
## 4. CONDICIONES DEL ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER FT-IR

Equipo	Marca Perkin Elmer, modelo Frontier FT-IR/NIR
Rango de barrido	4000 $\text{cm}^{-1}$ - 650 $\text{cm}^{-1}$
Fuerza aplicada	80
Tipo de accesorio	Universal ATR
Cristal UATR	Diamante/ZnSe
Saltos UATR	3
Identificación	Spectral Database Polymer Starter

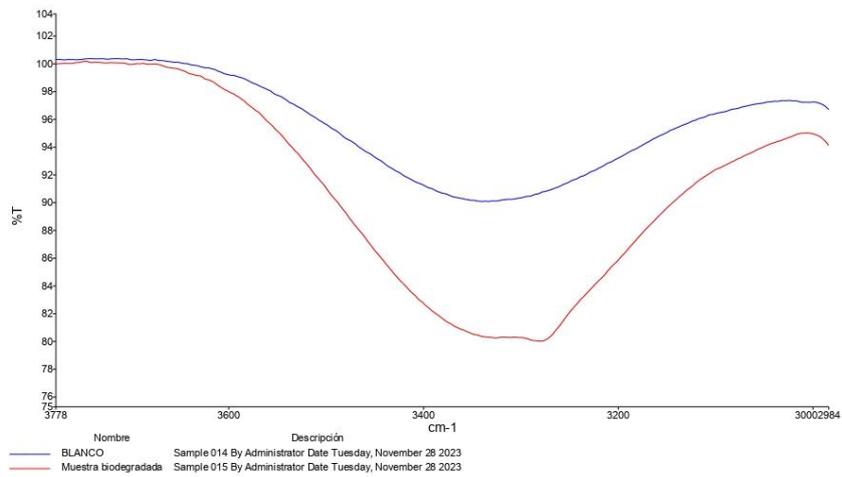
**7. ESPECTRO**

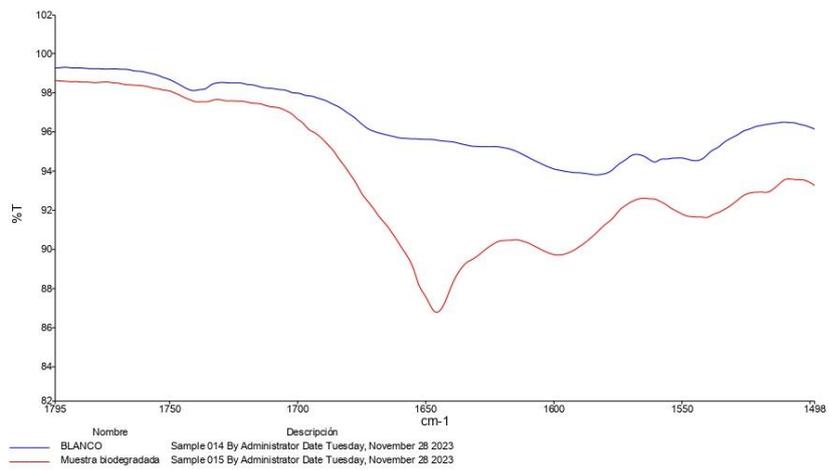
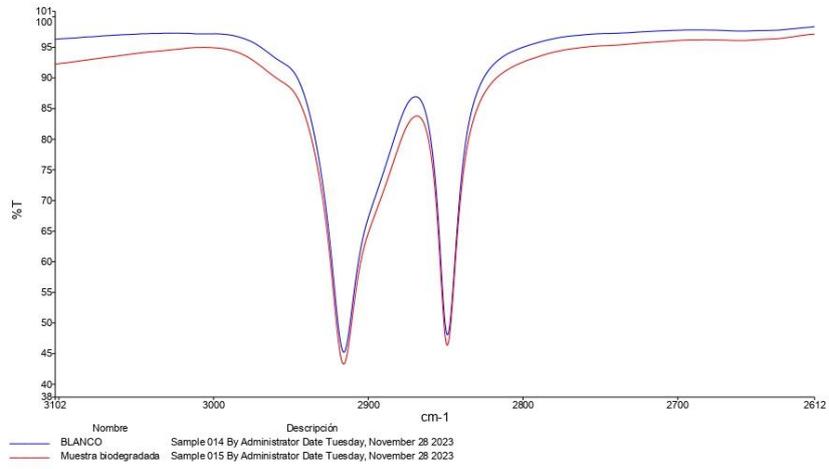


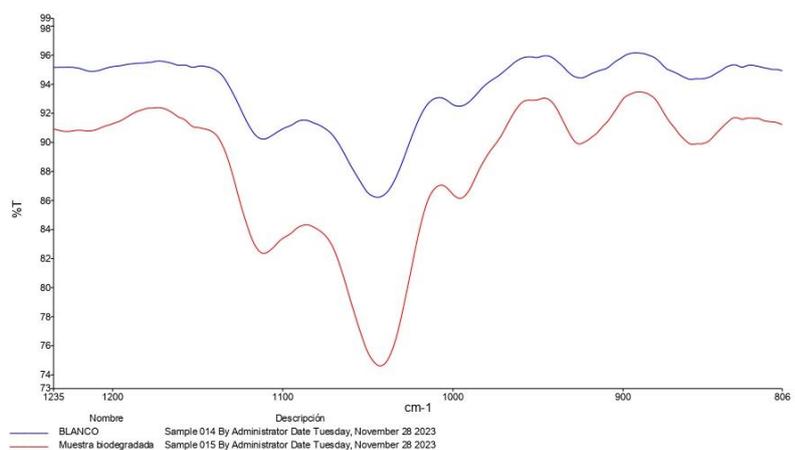
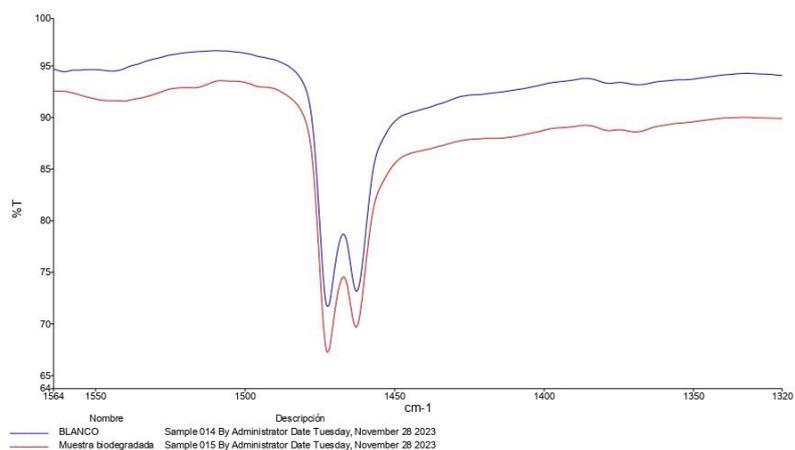
**COMPARACIÓN DE ESPECTROS**

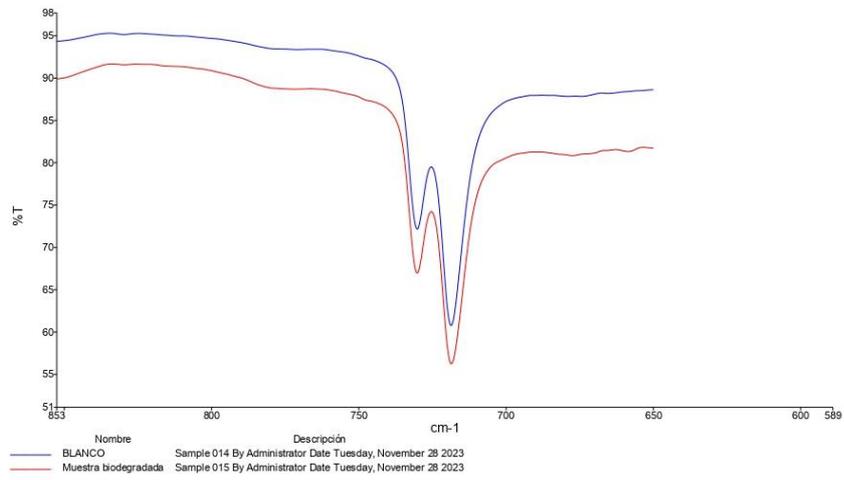


**DETALLE DE ALGUNOS PICOS SELECCIONADOS**









Anexo 8. Panel fotográfico de la etapa de campo



Imagen 1. Toma de muestra del punto 1 en la celda transitoria de Huanuyo



Imagen 2. Toma de muestra del punto 2 en la celda transitoria de Huanuyo



Imagen 3. Toma de muestra del punto 4 en la celda transitoria de Huanuyo



Imagen 4. Toma de muestra del punto 4 en la celda transitoria de Huanuyo



Imagen 5. Cooler con el contenido de las muestras de los 5 puntos



Imagen 6. Cooler con el contenido de las muestras de los 5 puntos

Anexo 9. Panel fotográfico de la etapa de laboratorio



Imagen 7. Muestras trasladadas al laboratorio de la UNAJ



Imagen 8. Inoculación de las muestras



Imagen 9. Siembra de las muestras



Imagen 10. Introducción de placas Petri



Imagen 11. Placas Petri incubadas a 37 °C



Imagen 12. Pesado del agar Sabouraud

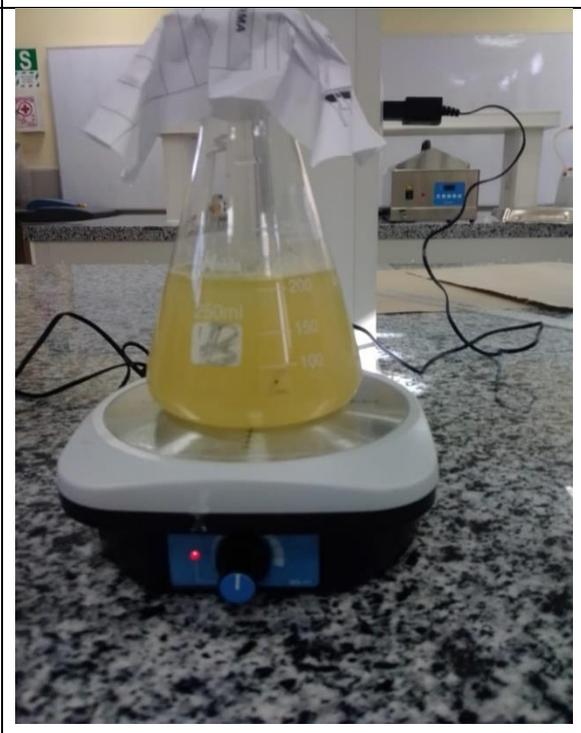


Imagen 13. Agitar para homogenizar

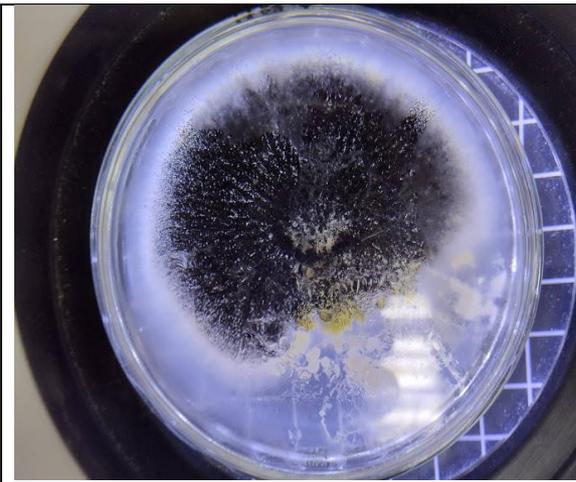


Imagen 14. Cepa de la M03-A

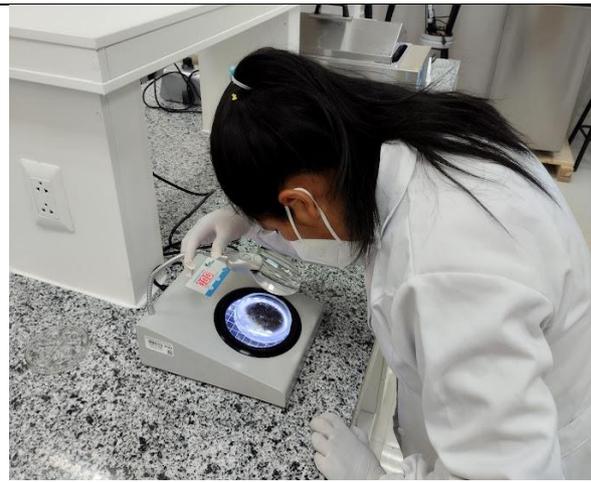


Imagen 15. Observación de la M03-A

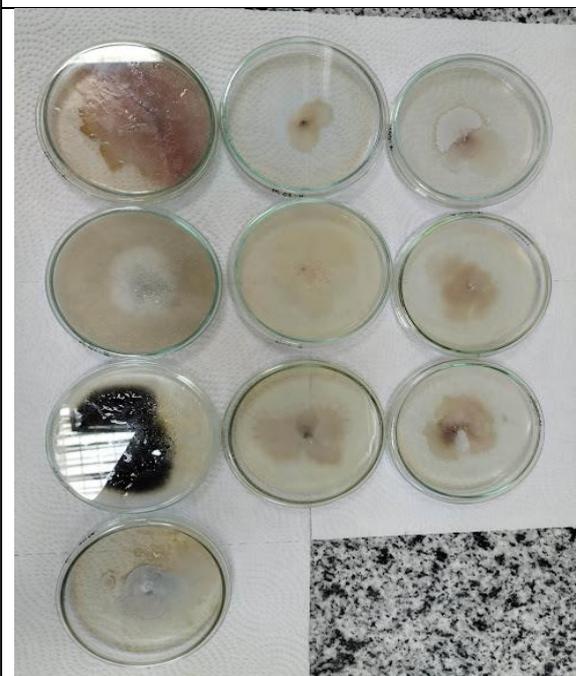


Imagen 16. Cepas de las cinco muestras



Imagen 17. Desinfección de la mesa

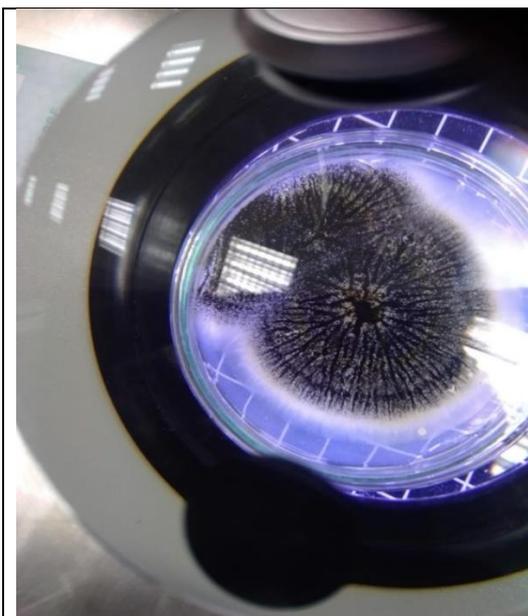


Imagen 18. Observación macroscópica

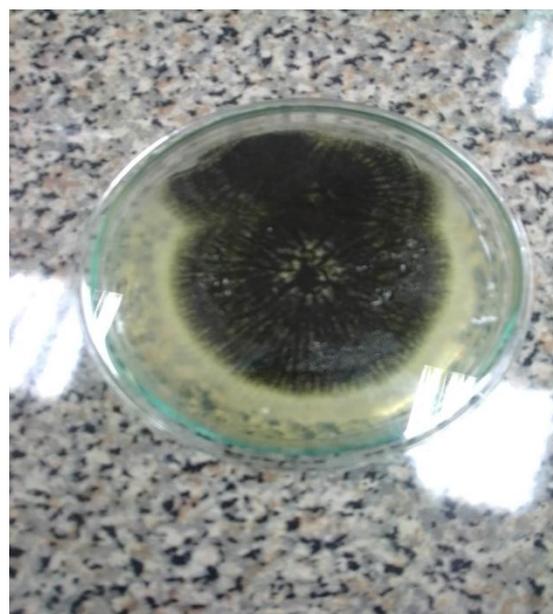


Imagen 19. Cepa pura aislada



Imagen 20. Observación microscópica

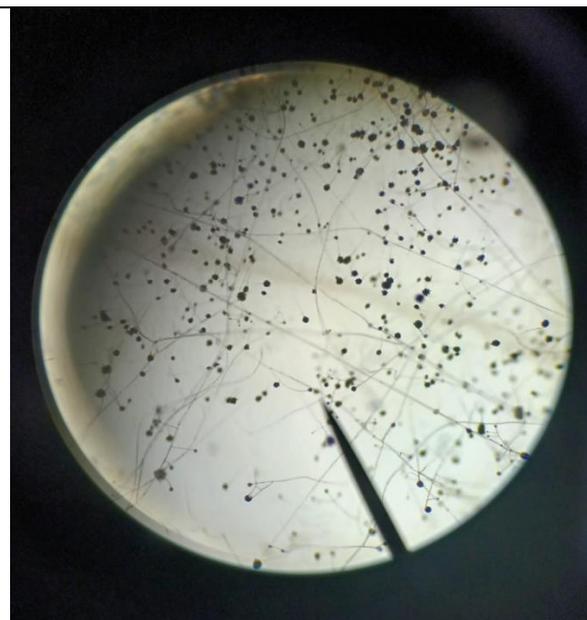


Imagen 21. Observación microscópica



Imagen 22. Corte de polietileno de baja densidad a 1.5 x 1.5 cm



Imagen 23. Siembra del aspergillus sp. e introducción de las láminas de PEBD a la muestra



Imagen 24. Introducción de PEBD



Imagen 25. Inoculación de *Aspergillus* sp.



Imagen 26. Muestras de 37°C a 3 días



Imagen 27. Muestras de 27°C a 3 días



Imagen 28. Muestras de 37°C a 7 días



Imagen 29. Reverso de muestras a 7 días



Imagen 30. Incubadoras condicionadas a 37°C, 27°C, 20°C



Imagen 31. Muestras a 37°C



Imagen 32. Muestras a 27°C



Imagen 33. Muestras a 20°C



Imagen 34. Muestras a 20°C

**UNW**

UW