

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



BIODEGRADACIÓN DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO Y DE POLIESTIRENO
MEDIANTE EL LÍQUIDO RUMINAL VACUNO Y EL GUSANO DE LA HARINA

(Tenebrio molitor), 2023

TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por la Bachiller:

NOEMI ELIZABETH LEYVA LÓPEZ

Asesora:

Ing. M. Cs. GIOVANA ERNESTINA CHÁVEZ HORNA

CELENDÍN – PERÚ

2024



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:

NOEMI ELIZABETH LEYVA LÓPEZ.

DNI: 74756902

Escuela Profesional/Unidad UNC:

De Ingeniería Ambiental

2. Asesor:

ING. M. Sc. GIOVANA E. CHÁVEZ HORNA

Facultad/Unidad UNC:

Ciencias Agrarias

3. Grado académico o título profesional

Bachiller

Título profesional

Segunda especialidad

Maestro

Doctor

4. Tipo de Investigación:

Tesis

Trabajo de investigación

Trabajo de suficiencia profesional

Trabajo académico

5. Título de Trabajo de Investigación:

"BIODEGRADACIÓN DEL TEREFALATO DE POLIETILENO Y DE POLIESTIRENO
MEDIANTE EL LÍQUIDO RUMINAL VACUNO Y EL GUSANO DE LA HARINA (*Tenebrio
molitor*), 2023

6. Fecha de evaluación: 26/03/2024

7. Software antiplagio: TURNITIN

URKUND (OURIGINAL) (*)

8. Porcentaje de Informe de Similitud: 9 %

9. Código Documento: oid:3117:342586792

10. Resultado de la Evaluación de Similitud: 9 %

APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 05/12/2024

Firma y/o Sello
Emisor Constancia



ING. M. Cs. GIOVANA E. CHÁVEZ HORNA
DNI: 40432609

*En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Celendín, a los veintiocho días del mes de noviembre del año dos mil veinticuatro, se reunieron en el aula 101 de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental - Sede Celendín, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 297-2024-FCA-UNC, de fecha 17 de julio del 2024**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la TESIS titulada: "**BIODEGRADACIÓN DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO Y DE POLIESTIRENO MEDIANTE EL LÍQUIDO RUMINAL VACUNO Y EL GUSANO DE LA HARINA (*Tenebrio molitor*), 2023**", realizada por la Bachiller **NOEMI ELIZABETH LEYVA LÓPEZ** para optar por el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las **diecisiete** horas con **veintiocho** minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la **APROBACIÓN** por **UNANIMIDAD** con calificativo de **DIECISEIS (16)**; por tanto, el Bachiller queda expedido para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las **dieciocho** horas y **veinticinco** minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Ing. M. Cs. Edgar Darwin Díaz Mori
PRESIDENTE

Ph. D. Manuel Roberto Roncal Rabanal
SECRETARIO

Ing. M. Cs. Adolfo Máximo Lopez Aylas
VOCAL

Ing. M. Cs. Giovana Ernestina Chávez Horna
ASESOR

COPYRIGHT © 2024 by
NOEMI ELIZABETH LEYVA LÓPEZ
Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

A Dios, mi creador, cuya guía inquebrantable ha sido fundamental en la realización de este trabajo. Su constante presencia y dirección han sido una fuente de fortaleza a lo largo de este proceso de investigación.

Asimismo, esta tesis está dedicada a la memoria de mi madre, quien lamentablemente ya no está entre nosotros. Le prometí que perseveraría en la búsqueda de mis metas y me convertiría en la persona que ella siempre anheló que fuese. Estoy convencida de que, desde su lugar en el cielo, siente orgullo por mis logros. Su amor inmenso ha dejado una huella imborrable en mi vida, y su influencia se refleja en cada página de este trabajo. Esta dedicatoria es un tributo a su legado y un recordatorio constante de su amor incondicional y apoyo inquebrantable.

AGRADECIMIENTO:

En el contexto de esta investigación, deseo expresar mi sincero agradecimiento a las personas cuya participación ha sido de suma importancia en su realización. Sus contribuciones, respaldo y ejemplaridad han sido pilares en el proceso:

Padre, Feliciano Leyva Silva: Su influencia en la inculcación de valores sólidos y principios éticos ha sido un faro en mi trayectoria. Su fuerza y capacidad para enfrentar desafíos son una constante fuente de inspiración, y su ejemplo ha sido crucial en mi formación.

Hermanos, Lili, Edgar, Miguel y Carlos Leyva López: Su apoyo inquebrantable ha sido un pilar fundamental en cada etapa de este proyecto. Son un referente a seguir en mi camino, y su respaldo ha sido inestimable.

Asesora, Ingeniera MCs. Giovana Ernestina Chávez Horna: Agradezco su compromiso, fortaleza y confianza en este proceso de investigación. La considero un modelo ejemplar, y su orientación ha sido esencial para la culminación de este proyecto.

Co-Asesor, Ingeniero Samamé Saavedra Mario Miguel: Su apoyo y estímulo inicial para emprender esta investigación son dignos de mención. Su respaldo ha representado una influencia motivadora y crucial en mi camino hacia el éxito.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO:	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.....	3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Antecedentes de la investigación	3
2.2. Bases Teóricas.....	7
2.2.1. Teoría de la biodegradación.....	7
2.2.2. Cultivo microbiano	8
2.2.3. Cultivo microbiano ruminal.....	9
2.2.4. Microorganismos productores de metano	10
2.2.5. Tenebrio molitor o gusano de harina	12
2.2.6. Mecanismos de biodegradación de microorganismos a los polímeros (plásticos)	17
2.2.7. Teoría del polímero.....	19

2.3.	Definición de términos básicos.	28
2.3.1.	<i>Biodegradación</i>	28
2.3.2.	<i>Microorganismos</i>	28
2.3.3.	<i>Microbiota</i>	29
2.3.4.	<i>Enzimas</i>	29
2.3.5.	<i>Polímeros</i>	29
2.3.6.	<i>Monómeros</i>	29
CAPÍTULO III.....		30
MATERIALES Y MÉTODOS		30
3.1.	Localización de la investigación	30
3.2.	Material experimental	32
3.3.	Procedimiento.....	32
3.4.	Tratamiento y análisis de datos	38
CAPÍTULO IV.....		40
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		40
4.1.	Velocidad de reacción biológica del cultivo microbiano líquido ruminal vacuno en la degradación del PET y EPS	40
4.2.	Velocidad de reacción biológica del gusano de la harina (<i>Tenebrio molitor</i>) en la degradación del PET y EPS	43
4.3.	Reducción del tereftalato de polietileno y poliestireno	47

4.4. Parámetros fisicoquímicos que influyen en los cultivos microbianos	51
CAPÍTULO V	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
5.1. Conclusiones	53
5.2. Recomendaciones.....	54
CAPÍTULO VI.....	55
REFERENCIAS.....	55
ANEXOS	68
ANEXO I. Cálculo de la velocidad de reacción biológica del líquido ruminal en la degradación de PET y EPS.....	69
ANEXO II. Cálculo de la velocidad de reacción biológica del <i>Tenebrio molitor</i> en la degradación de PET y EPS.....	70
ANEXO III Porcentaje de remoción del peso del PET y EPS.....	71
ANEXO IV. Panel fotográfico.....	72
ANEXO V. Informes de laboratorio de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental.....	76
ANEXO VI. Solicitud de permiso para el uso de laboratorio.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación taxonómica del <i>Tenebrio molitor</i>	12
Tabla 2 Plásticos catalogados a nivel mundial.....	20
Tabla 3 Análisis de varianza	39
Tabla 4 Velocidad de reacción biológica del cultivo microbiano líquido ruminal vacuno	40
Tabla 5 Análisis de la varianza ANOVA en función a la velocidad de reacción del líquido ruminal vacuno en la degradación del PET y EPS	43
Tabla 6 Velocidad de reacción del gusano de la harina (<i>Tenebrio molitor</i>)	44
Tabla 7 Análisis de la varianza ANOVA en función a la velocidad de reacción del <i>Tenebrio molitor</i> en la degradación de PET y EPS.....	46
Tabla 8 Masa inicial y final de los polímeros y su porcentaje de degradación.....	47
Tabla 9 Parámetros fisicoquímicos que influyen en los cultivos microbianos	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del ciclo de vida del <i>Tenebrio molitor</i>	15
Figura 2 Estructura química del PET y sus productos de degradación	23
Figura 3 Ruta de degradación del estireno.....	24
Figura 4 Ubicación geográfica de la investigación.....	31
Figura 5 Diseño experimental y arreglo de los tratamientos.	33
Figura 6 Preparación del tereftalato de polietileno y el poliestireno	34
Figura 7 Observación en el microscopio de las láminas de PET y EPS antes del tratamiento a: PET, b: EPS	34
Figura 8 Determinación de peso del PET y EPS antes de aplicar los tratamientos	35
Figura 9 Incubación de los frascos con los tratamientos	36
Figura 10 Extracción y lavado de las laminas	37
Figura 11 Observación en el microscopio de las láminas de PET y EPS después de los tratamientos, a: PET y b: EPS.....	38
Figura 12 Velocidad de reacción biológica del líquido ruminal vacuno	42
Figura 13 Velocidad de reacción biológica del <i>Tenebrio molitor</i>	45
Figura 14 Degradación de los polímeros por el líquido ruminal	49
Figura 15 Degradación de los polímeros con el <i>Tenebrio molitor</i>	50

RESUMEN

Dado el creciente problema de acumulación de plásticos (tereftalato de polietileno PET y poliestireno EPS) en el medio ambiente, es importante comprender los procesos de degradación de estos polímeros. El experimento se llevó a cabo en un entorno de laboratorio, y consistió en dos tratamientos: uno utilizando líquido ruminal vacuno y el otro con *Tenebrio molitor* (gusano de la harina). Se evaluó la capacidad de degradación de los polímeros en cuatro intervalos de tiempo (30, 60, 90 y 120 días); el tratamiento con líquido ruminal (250 ml + 0.2109 g de PET y 0.0730 g de EPS + incubación a 24 °C), el tratamiento del *T. molitor*, (30 larvas + 0.2143 g de PET y 0.08823 g de EPS), cada tratamiento en cinco repeticiones por intervalo de tiempo. Los resultados obtenidos: el mayor porcentaje de degradación (basándose en líquido ruminal vacuno) es de polietileno de tereftalato con 5.77% a los 120 días y 1.15% a los 30 días, por otro lado, de poliestireno es 1.9% a los 120 días y 0.4% a los 30 días. El mayor porcentaje de degradación (basándose en el *T. molitor*) es de poliestireno con 38.2% a los 120 días y 5.7% a los 30 días, sin embargo, de tereftalato de polietileno es 0.63% a los 120 días y 0.11% a los 30 días. Se concluyó que el líquido ruminal es más eficaz en la degradación del tereftalato de polietileno, mientras que el *T. molitor* muestra una mayor eficiencia en la degradación del poliestireno.

Palabras clave: Degradación, polímeros, líquido ruminal vacuno, *Tenebrio molitor*.

ABSTRACT

Given the growing problem of plastic accumulation (polyethylene terephthalate PET and expanded polystyrene EPS) in the environment, it is important to understand the degradation processes of these polymers. The experiment was conducted in a laboratory setting, consisting of two treatments: one using bovine rumen fluid and the other using *Tenebrio molitor* (mealworm). The degradation capacity of the polymers was evaluated at four time intervals (30, 60, 90, and 120 days). The treatment with rumen fluid (250 ml + 0.2109 g of PET and 0.0730 g of EPS + incubation at 24°C), and the *T. molitor* treatment (30 larvae + 0.2143 g of PET and 0.08823 g of EPS) were each applied with five repetitions per time interval. The results obtained showed that the highest percentage of degradation (based on bovine rumen fluid) for polyethylene terephthalate was 5.77% at 120 days and 1.15% at 30 days, while for polystyrene it was 1.9% at 120 days and 0.4% at 30 days. The highest percentage of degradation (based on *T. molitor*) for polystyrene was 38.2% at 120 days and 5.7% at 30 days, whereas for polyethylene terephthalate it was 0.63% at 120 days and 0.11% at 30 days. It was concluded that bovine rumen fluid is more effective in degrading polyethylene terephthalate, while *T. molitor* shows greater efficiency in degrading polystyrene.

Keywords: Degradation, polymers, bovine rumen fluid, *Tenebrio molitor*.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos representa un desafío urgente y relevante. El crecimiento poblacional incrementa exponencialmente la generación de plásticos, lo que a menudo pone a los gobiernos locales, tanto distritales como en centros poblados, ante este reto sin una planificación adecuada. La falta de un manejo eficiente en los distritos propicia condiciones que pueden desencadenar problemas ambientales y sociales.

Es imperativo que la sociedad priorice la solución a las deficiencias en el manejo de residuos plásticos y que se tomen medidas efectivas sin que estas sean perjudiciales para el bienestar a largo plazo de la comunidad o que resulten en daños al medio ambiente. En 2025, el volumen mundial de residuos plásticos rebasará la barrera de los 400 millones de toneladas, de los que casi un 50% terminará en vertederos y apenas un 10% será reciclado. Las proyecciones indican que el volumen de desechos plásticos aumentará constantemente en las próximas décadas, superando los 1.000 millones de toneladas para 2060. Para ese año, la tasa de reciclaje habrá casi duplicado su valor actual, aunque la proporción de plástico vertido se mantendrá relativamente estable (Fernández, 2024, p. 1).

El destino final de los polímeros sintéticos es preocupante. Se estima que el 72% de los plásticos producidos hasta la fecha se acumulan en vertederos o en el medio ambiente, mientras que el 19% se incinera y solo el 9% se recicla (Espinola y Sturzenegger, 2024). La degradación de plásticos grandes en microplásticos ocurre de manera natural, impulsada por la radiación solar y la abrasión de las olas. Sin embargo, en entornos acuáticos este proceso es más lento debido a las bajas temperaturas y la limitada exposición a los rayos UV (GESAMP, 2015, p. 8).

En diversos países, tanto desarrollados como en desarrollo, se implementan soluciones para abordar la acumulación de plásticos en el medio ambiente, que incluyen el uso de microorganismos en los procesos de biodegradación y el compromiso de los productores de plástico para reciclar estos materiales, lo que resulta económicamente beneficioso (ONU, 2017, p. 3). En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la capacidad de biodegradación del tereftalato de polietileno y del poliestireno utilizando líquido ruminal vacuno y *Tenebrio molitor* en 2023?

En este contexto de búsqueda de soluciones para la acumulación de plásticos en el medio ambiente, la presente investigación se centra en determinar la capacidad de biodegradación de los cultivos microbianos presentes en el líquido ruminal vacuno y en el gusano de la harina (*Tenebrio molitor*) para reducir el tereftalato de polietileno y el poliestireno. Para alcanzar este objetivo general, se plantean varios objetivos específicos, como evaluar la velocidad de reacción biológica del cultivo microbiano del líquido ruminal y del *Tenebrio molitor*, así como cuantificar la reducción de los polímeros mencionados.

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes de la investigación

En este marco, Bermúdez Morera (2021) evaluó microorganismos, específicamente *Trichoderma spp.* y *Pseudomonas aeruginosa*, con capacidad para degradar el PET. La metodología consistió en la revisión de literatura científica que analizó diversas teorías y enfoques sobre biodegradación. Los resultados indicaron que *Pseudomonas aeruginosa* presentó una capacidad de degradación superior al 14% (p/p), mientras que *Trichoderma spp.* alcanzó un 13,15% (p/p). Concluyó que *Pseudomonas aeruginosa* es más recomendable para procesos de degradación, resaltando la importancia de controlar sus requisitos operativos para el desarrollo de un proceso biotecnológico eficaz en la degradación del polímero (p. 12).

Asimismo, López Paredes (2020) investigó la conservación de las larvas de las especies *Tenebrio molitor* y *Dermestes sp.*, sometidas a dos tipos de alimentación basados en polímeros sintéticos (polietileno y poliestireno). La metodología empleada fue experimental y cuantitativa, con pruebas realizadas en un período de 10 días, donde cada tratamiento incluyó un grupo control de larvas de igual etapa y tamaño. Los resultados mostraron que, como era previsible,

ambas especies tuvieron mayor capacidad de supervivencia con el poliestireno, adaptando este polímero a su metabolismo como sustrato. En contraste, ninguna de las especies logró biodegradar eficientemente el polietileno. Concluyó que en investigaciones futuras se deberían utilizar larvas en procesos biotecnológicos de biodegradación a mayor escala, generando un impacto positivo en la sociedad (p. xii).

También, Camacho y Hoyos (2014) investigaron la biodegradación de tres variedades de polímeros: celulosa, polietileno y una muestra compuesta por almidón de mandioca, ácido poliláctico y policaprolactona, en un ambiente anóxico. La metodología fue experimental y cuantitativa, consistiendo en acondicionar un inóculo metanogénico termófilo a partir de residuos sólidos. Se obtuvieron concentraciones de metano en el gas generado y un pH del medio de 59,6% y 7,89, respectivamente. Los resultados de biodegradación tras 15 días en condiciones anaerobias fueron de 77,49% para el dato positivo, 61,27% para la muestra de ensayo y 0,31% para el dato negativo. Concluyó que el inóculo utilizado mostró una adecuada actividad microbiana sobre el polímero, evidenciada por el 61,27% de biodegradación, el 59,35% de metano en gas y un pH final de 7,71 en los biorreactores de la muestra de ensayo. Estos valores demostraron la capacidad del polímero para ser metabolizado en condiciones anóxicas a altas temperaturas y con grandes cantidades de sólidos (p. 20).

Asimismo, Butrón Pinazo (2020) investigó la capacidad de degradación de *Pseudomonas aeruginosa* aislada de un basural frente al polímero plástico polietileno de baja densidad (PEBD). La metodología fue aplicada con un diseño experimental que incluyó el aislamiento e identificación del género y especie, basándose en diferencias observadas en colonias sembradas en placas con medio mineral y pequeños fragmentos del polímero sintético. Bajo condiciones de temperatura entre 25 y 35 °C y pH entre 5.0 y 7.0 durante 30 días, se determinó la capacidad

degradativa de la cepa estudiada, logrando una pérdida de peso del material entre 21,7% y 27,3% a 25 °C y 35 °C, respectivamente, en un pH de 7.0. Concluyó que la cepa de *Pseudomonas aeruginosa* alcanzó una mayor degradación del material dentro del rango de temperatura de 25 a 35 °C (p. viii).

De igual manera, Barbarán et al. (2018) llevaron a cabo un estudio centrado en la degradación del tereftalato de polietileno mediante la aplicación de la cepa *Pseudomonas aeruginosa* en condiciones controladas de laboratorio. La metodología utilizada fue experimental, empleando 35 gramos del polímero sintético, que fue previamente triturado y pulverizado, el cual se introdujo en el medio que contenía la cepa de *Pseudomonas aeruginosa* a concentraciones de 18×10^7 UFC, 36×10^7 UFC y 9×10^8 UFC, y se sometió a períodos de incubación de 15, 25 y 35 días, con sus respectivas repeticiones. El análisis estadístico mediante ANOVA y la prueba de Duncan reveló que la cepa biodegradó un 19,93% del PET a una concentración de 9×10^8 UFC. Concluyó que *Pseudomonas aeruginosa* es más efectiva en la biodegradación a mayores concentraciones (p. 9).

Asimismo, Daviran Yance (2017) realizó una investigación en la que se buscó biodegradar el poliestireno, adaptándolo al metabolismo de *Tenebrio molitor* para generar humus. La metodología fue experimental, utilizando láminas de tecnopor de dos densidades: D10 (10 Kg/m^3) y D40 (40 Kg/m^3) a 21 °C. A los 4 días de biodegradación, para el EPS D10 se registraron 0,0416 g de consumo, 0,0307 g de excreta y 0,0848 g de pérdida de biomasa. Para el EPS D40, los resultados fueron un consumo de 0,1460 g, una excreta de 0,1635 g y una pérdida de 0,3529 g en 8 días. Las eficiencias fueron del 12,20% para el EPS D10 y del 2,60% para el EPS D40. Finalmente, determinó que la biodegradación del tecnopor fue poco eficiente, influenciada por factores como el canibalismo y restos de muda de piel (p. XII).

De igual manera, Portocarrero Estrada (2021) llevó a cabo un estudio sobre la degradación de poliestireno con *T. molitor* para promover el desarrollo sostenible en las compañías. La metodología se basó en una exhaustiva investigación bibliográfica de tipo cualitativa, que propuso la adecuada disposición de residuos plásticos de la industria de alimentos y el desarrollo de un proceso biotecnológico para la degradación de este polímero sintético utilizando *T. molitor*. Este enfoque cumplió con los propósitos de desarrollo a largo plazo, la preservación de la salud, el ahorro de agua y un consumo responsable, evitando la generación de plásticos contaminantes para los ecosistemas. Como resultado de la búsqueda de información científica sobre la biodegradación de compuestos sintéticos por parte de *T. molitor*, se concluyó que aplicar larvas para la biodegradación resulta ser una estrategia valiosa para las empresas que buscan cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible (p. 3)

Asimismo, Chunga y Cieza (2016), en su investigación, proponen la degradación de un polímero sintético (poliestireno) usando consorcios microbianos presentes en el estiércol de lombriz en el último trimestre del año. La metodología es de corte experimental y propone trabajar con láminas de poliestireno expandido ubicadas a distintos niveles de profundidad en maceteros que contienen estiércol de lombriz con microorganismos de diferentes géneros y especies. Los resultados del proceso experimental determinaron la pérdida de peso de las muestras de poliestireno a diferentes profundidades (superior, media y fondo) de los maceteros durante 90 días, con los siguientes datos: octubre: 0%, 0.4% y 1.6%; noviembre: 0.4%, 0.8% y 4.8%; y diciembre: 0%, 0.8% y 3%. En función a estos resultados, se deduce que el mayor porcentaje de pérdida de peso se notó en el fondo del macetero, con un porcentaje total de (p. 8).

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Teoría de la biodegradación

El enfoque microbiológico indica que es un proceso natural que degrada polímeros sintéticos y de los cuales se obtendrán como productos al dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), agua (H₂O) y biomasa, esto se lleva a cabo principalmente por la acción enzimática de los microorganismos, además menciona que la biodegradación es la descomposición de la materia orgánica por parte de organismos degradadores como (bacterias, hongos, protozoarios; etc.) mediante el ataque de los microorganismos a la superficie de los polímeros, la cual además va depender de los factores intrínsecos de los materiales como la tensión superficial, porosidad, textura superficial, etc. (Callo et al., 2020, p. 49).

El enfoque bioquímico sobre la biodegradación indica que se trata de la transformación de los diferentes compuestos a moléculas más simples, por ataque de microorganismos esto se refiere a la adherencia de microorganismos sobre el material plástico, mediante una segregación de enzimas extracelulares las cuales inicia la degradación de los polímeros. Una forma práctica de evaluar la biodegradación de los diferentes tipos de polímeros (naturales o sintéticos); es mediante la evaluación de la disminución o incremento del peso, al inicio la descomposición del polímero los microorganismos se adhieren y pueden aumentar el peso. (Gajendiran et al., 2016, p. 4)

El enfoque físico del deterioro del PET, señala que al momento de aplicar temperaturas más elevadas a los residuos plásticos u otros la energía captada origina la alteración de las partículas subatómicas de su composición química, lo cual va a producir un aumento de energía cinética y estimulación adjunta lo cual desprende nuevos efectos en la descomposición (Montoya et al., 2010, p. 5).

La biodegradación es la modificación bioquímica de las moléculas mediante el trabajo enzimático que realizan los microbios. La biodegradabilidad de una mezcla debido a la acción de diversas enzimas, son originados por la acción de los microorganismos. Los componentes poliméricos ayudan como principio para lograr obtener una fuente de carbono. Por otra parte, las colonizaciones de los microorganismos únicamente se generan a una determinada temperatura, por esta razón este tipo de procedimiento de degradación es muy poco habitual. Las actividades enzimáticas pueden fragmentar pedazos diminutos del material, originando subproductos de baja densidad que son agregados a la biomasa celular o ser convertidos en moléculas más simples, como el bióxido de carbono y agua en condiciones aeróbicas, o metano llamado también gas de los pantanos y bióxido de carbono en ausencia de oxígeno (Limón Gonzáles, 2001, p. 33).

2.2.2. Cultivo microbiano

El enfoque ecológico señala que el cultivo microbiano es una comunidad nativa de muchas agrupaciones microbiológicas de diferentes variedades que posee las mismas características con el objetivo de interactuar a la misma vez ya sea para el intercambio de alimentos o dar equilibrio a las diferentes variedades de microorganismos existentes en el cultivo, este trabajo organizado lo llevan a cabo cada tipo de microorganismos con el propósito de mantener y desarrollar a la comunidad microbiana (Gutiérrez Álvarez, 2019, p. 28).

Por otro parte, algunos microorganismos son unicelulares e individuales y cuando se agrupan forman asociaciones llamados comunidades microbianas, estas comunidades cuando se interrelacionan y establecen las particularidades en su ecosistema originando cambios en él. Las comunidades microbianas de la tierra exceden con respecto al resto de seres vivos que habitan en todos los ecosistemas (Madigan et al. 2015, p. 23).

2.2.3. Cultivo microbiano ruminal

En la cavidad ruminal de los herbívoros se han acumulado y establecido por muchos miles de años comunidades microbianas con peculiaridades particulares, las cuales se interrelacionan originando productos de su asimilación fisiológica sustancias que ayudan y favorecen la biodegradación de nutrientes asimilables para el herbívoro, mediante estudios se ha establecido que viven cerca de 8% hongos y 40% protozoarios (Díaz et al., 2019, p. 13).

A su vez, en la fase líquida (fluido o líquido ruminal), los microorganismos se hallan en estado libre y se alimentan de proteínas y carbohidratos solubles. Representan entre el 20 y el 30% de la biomasa bacteriana. Más del 70% del microbiota ruminal está asociada con la fase sólida del contenido ruminal, y se estima que es responsable de entre el 88 y el 91% de la actividad fibrolítica, el 70% de la actividad amilasa y el 75% de la actividad proteolítica del rumen, lo que la convierte en la fracción metabólicamente más crucial del sistema ruminal (Mirón et al., 2001, p. 1295).

Las poblaciones microbianas en el ecosistema ruminal interactúan de manera sinérgica para maximizar la eficiencia de la fermentación de los sustratos. En términos de nutrición microbiana, se pueden identificar dos grupos principales de microorganismos: aquellos que realizan la fermentación primaria de los sustratos y aquellos que fermentan los productos resultantes de esta fermentación primaria. Esta segunda población desempeña un papel crucial en la eliminación de los productos finales de la fermentación primaria y en la provisión de factores de crecimiento esenciales para los microorganismos fermentadores primarios. Por lo tanto, en cultivos puros, es común observar una gama más amplia de productos finales en comparación con cultivos mixtos de microorganismos ruminales. Un ejemplo ilustrativo de esta dinámica es la producción de ácidos grasos volátiles de cadena ramificada por parte de especies aminolíticas,

que son esenciales para las especies celulolíticas en la síntesis de aminoácidos y en la producción de ácidos grasos de cadena larga (Rotger Cerdá, 2004, p. 12).

Además, El consorcio microbiano del líquido ruminal vacuno es el encargado de convertir mediante el proceso de asimilación los nutrientes, y producir como resultado gases tales como: gas metano y bióxido de carbono, estos microorganismos por lo general anaerobios, también algunas especies de *cocos*, *cocobacilos*, *espiroquetas*, etc. Existen diferentes tipos de microorganismos en función de su preferencia metabólica por los sustratos nutricionales:

Celulosa: *Bacteroides ruminicola*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens*, *R. albus*.

Hemicelulosa: *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens*, *R. albus*.

Amilosa: *Bacteroides amylophilus*, *B. ruminicola*, *Streptococcus bovis*, *Succinomonas amilolítica*.

Proteínas *Bacteroides amylophilus*, *B. ruminicola*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Streptococcus bovis*.

Pectina: *B. Fibrisolvens* y *Lachnospira multiparus* y diferentes *protozoarios*.

(González, 2002, como se citó en Díaz et al., 2019, p. 14)

2.2.4. Microorganismos productores de metano

Existe un tipo de microorganismos que producen gas metano y se encuentran presentes en el rumen de los herbívoros y estos son: *Methanobacterium formicicum bryantii*; *Methanobrevibacter ruminantium smithii*; *Methanomicrobium mobile*; *Methanosarcina barkeri* y *Methanoculleus olentangyi* (Díaz et al., 2019, p. 18).

La vía metanogénica es una forma anaerobia de respiración celular en la cual el hidrógeno molecular se oxida y el dióxido de carbono se reduce para formar metano, proceso conocido como metanogénesis hidrogenotrófica. Además del CO₂, el acetato y compuestos metilados también pueden actuar como sustratos en este proceso, aunque el hidrógeno molecular es principalmente utilizado para reducir el CO₂. En el caso de la variante acetotrófica, es relevante considerar su contraparte acetogénica, un proceso en el cual el ácido acético se sintetiza a partir de dióxido de carbono e hidrógeno diatómico (Bonilla et al, 2020, p. 38).

La mayor parte del metano entérico se produce en el rumen, representando entre el 85% y el 95% del total, mientras que solo un 5% a 15% se genera en el intestino grueso. Este gas se produce principalmente por las arqueas metanogénicas a partir de los productos resultantes de la fermentación de la materia orgánica de los alimentos. La mayoría de estas arqueas utilizan CO₂ e hidrógeno para la generación de metano, aunque existe un pequeño grupo que produce metano a partir de la reducción del ácido acético ($\text{CH}_3\text{COOH} - \text{CH}_4 + \text{CO}_2$). Además, existen otras fuentes menores para la síntesis de metano, como el ácido fórmico, las metilaminas, el metanol, el metanotiol y el sulfuro de metilo (Dolores et al., 2018, p. 32).

La metanogénesis es un proceso intrínseco en el metabolismo de los rumiantes que no puede ser eliminado, pero su impacto puede ser mitigado mediante estrategias alimenticias. Entre las estrategias más utilizadas se encuentran el aumento del consumo animal, la modificación en la composición de la dieta, la reducción de los protozoos y la mejora de la eficiencia de la digestión de la fibra. Se ha observado que la tasa de emisión de metano debido a la fermentación ruminal está influenciada por la especie, la edad y las propiedades fisicoquímicas de los alimentos consumidos por el ganado. Esto afecta directamente al nivel de ingesta, ya que se produce una mayor cantidad de metano en el rumen cuando el animal consume forrajes poco

digestibles y de baja calidad (Bonilla et al, 2020, p. 39). Del mismo modo, Dolores et al. (2018), entre los factores dietéticos que influyen en la producción de metano se encuentran la cantidad de materia orgánica fermentada, la composición de macromoléculas (como almidón, celulosa, proteínas, etc.) y el perfil de los ácidos grasos volátiles generados (AGV) durante la fermentación ruminal. La materia orgánica fermentada está mayormente compuesta por carbohidratos (estructurales y de reserva), así como por proteínas (p. 32).

2.2.5. Tenebrio molitor o gusano de harina

La familia de los gusanos es extensa y se conocen alrededor de 14600 tipos que muestra distintas características como su morfología, tamaño, color y forma difieren marcadamente dependiendo de la especie (Díaz Gámez, 2014, p. 49).

El *Tenebrio molitor* gusano de harina pertenece a las larvas de dos clases de escarabajos oscuros de la familia *Tenebrionidae*, el escarabajo amarillo (*Tenebrio molitor* Linnaeus) y el escarabajo oscuro común (*Tenebrio obscurus* Fabricius), esta clase de escarabajos son nativos de Europa y hoy se distribuyen alrededor del mundo (Azagoh et al., 2016; Makkar et al., 2014).

Tabla 1

Clasificación taxonómica del Tenebrio molitor,

Nombre Científico	<i>Tenebrio molitor</i> Linnaeus
Clase	Insecto
Orden	Coleóptero
Familia	<i>Tenebrionidae</i>
Género	<i>Tenebrio</i>
Especie	<i>Molitor</i>

Nota: adaptada de Vásquez (2016)

Características morfológicas del *Tenebrio molitor*

Llamado también gusano de harina, pertenece al orden coleóptero, presenta color castaño oscuro, su cuerpo es duro con bordes similares. En su etapa adulta tiene unas dimensiones aproximadas de 18.0 mm de largo por 4.0 mm de ancho (Corredor Bejar, 2022, p. 6)

Según lo descrito por Pérez y Pineda (2020), el *Tenebrio molitor* presenta diversas características morfológicas a lo largo de sus etapas de desarrollo:

Huevo: Mide aproximadamente 1.6 ± 0.1 mm de largo y 0.7 ± 0.1 mm de ancho, con forma ovalada, superficie lisa y textura mucilaginosa. Los huevos son semi-translúcidos.

Larva: Alcanzan una longitud promedio de 26.8 ± 1.9 mm. Tienen una coloración crema con bandas transversales marrón claro. Desde los primeros estadios presentan mandíbulas esclerotizadas de color café oscuro. El protórax es más grande en comparación con el mesotórax y metatórax, mientras que el abdomen es cilíndrico con 9 segmentos, destacándose el primero por una mayor cantidad de setas. El último segmento termina en forma cónica con pseudópodos retráctiles.

Pupa: Mide 18.2 ± 0.8 mm y es de tipo exarata. Al formarse, tiene una coloración blanca que se torna crema con el tiempo, y las extremidades y mandíbulas se oscurecen por esclerotización. Presenta bandas transversales claras en los segmentos y dos proyecciones cónicas en el último segmento abdominal.

Adulto: Los adultos miden aproximadamente 14.2 ± 1.2 mm, con una coloración que varía entre marrón oscuro y negro brillante. Poseen un cuerpo ovalado, antenas filiformes de 11 segmentos y élitros con estrías lineales y punciones circulares que se observan en diversas partes del cuerpo, como el clípeo y extremidades (p. 20-22).

Ciclo de vida del *Tenebrio molitor*

El ciclo de vida del *Tenebrio molitor* es cambiante, tiene una duración de 280 – 600 días. Las hembras llegan a depositar de 250 a 1000 huevos de color blanco, de forma arriñonada en forma de racimos sobre los alimentos. Los huevos son incubados por un tiempo de 10 a 12 días, a una temperatura ambiental comprendida entre los 18° a 20°C. Al término de este tiempo eclosionan larvas blancas que van alcanzando un color amarillento conforme van desarrollando, las cuales en su estado de adulto miden de 2.5 a 3.75 cm de largo (Díaz Gámez, 2014, p. 25).

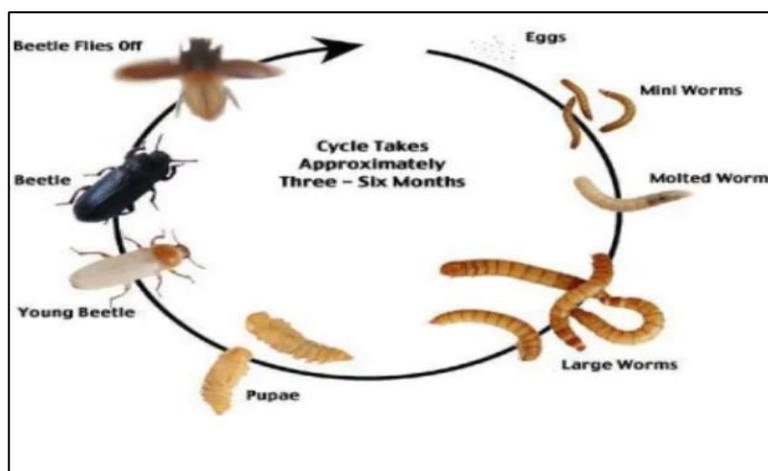
Durante este período, *T. molitor* transita por varias etapas que duran entre 3 y 4 meses; sin embargo, en condiciones desfavorables, como temperaturas bajas o disponibilidad limitada de alimentos, el ciclo de vida podría extenderse hasta año y medio. La variación en la duración del ciclo se debe a la plasticidad fenotípica de la especie, lo que le permite adaptarse a fluctuaciones ambientales, prolongando así su desarrollo morfológico y ciclo reproductivo según las condiciones del entorno (Makkar et al., 2014, p. 50).

Los gusanos maduros tienen un aspecto amarillento y marrón claro, con una longitud y peso de 20 mm y 160 mg respectivamente, en la actualidad los criadores de larvas agregan una hormona en la alimentación para impedir que evolucionen y lleguen a ser adultos, dando como resultado larvas de mayor tamaño que adquieren los 2 cm de longitud y un peso de 300 mg (Makkar et al., 2014, p. 51).

La siguiente fase es pupa, y esta tiene un período de 7 a 9 días con una temperatura de 25°C o en algunos casos podría alcanzar hasta 20 días a temperaturas más bajas. Al final del período llega a etapa de estado adulto convirtiéndose en escarabajo y puede llegar a vivir 2 a 3 meses (Azagoh et al., 2016; Makkar et al., 2014).

Figura 1

Esquema del ciclo de vida del *Tenebrio molitor*



Nota: muestra el ciclo de vida del *T. molitor* que abarca: (huevos, mini gusanos, gusanos grandes, pupas, escarabajos jóvenes y adultos. Duración: 3 a 6 meses. (Medrano Vega, 2019, p. 13)

Microbiota del *Tenebrio molitor*

Es sabido que los escarabajos almacenan una variada diversidad de microorganismos en su flora intestinal muy favorable para ellos. Dentro del microbiota del *Tenebrio molitor* destaca una serie de microorganismos que pueden estar presentes en sus excreciones y que son provechosas para los cultivos. Entre ellas tenemos (Jung et al., 2014, p. 889).

a. *Paenibacillus sp.*

Es una especie de bacteria con un amplio beneficio en la agricultura, puesto que se incluyen entre las llamadas bacterias promotoras del desarrollo de las plantas, al contribuir en el aporte de nitrógeno a las plantas, la absorción de K, Ca y Mg, la solubilidad de fosfatos, la elaboración de sideróforos y de auxinas, y la resistencia ante estreses abióticos por metales pesados, sequía y salinidad; así mismo, presenta actividad antifúngica contra hongos fitopatógenos como *Colletotrichum gloeosporoides*, *Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea*, *Phytophthora capsici* o *Rhizoctonia solani*, bacterias como *Pectobacterium caratovorum*, y

nemátodos como *Meoidogyne incognita*; incluso es idónea para descomponer pesticidas organofosforados residuales presentes en el suelo (Zhang et al., 2013, p. 44).

b. *Bacillus sp.*

Grupo de bacterias promotoras del crecimiento de plantas en la rizosfera (PGPRs) la especie más representativa es *B. thuringiensis*, debido a sus capacidades de sintetizar una proteína insecticida muy eficiente. Pero hay otras especies capaces de inducir el crecimiento y el desarrollo de las plántulas, fijar el nitrógeno atmosférico, producir sideróforos, solubilizar fosfatos, y producir auxinas que ayudan a la formación de raíces de las plantas, además es capaz de estimular en las plantas una tenacidad sistémica frente a la agresión de las plagas y patógenos, al mismo tiempo tiene acción inmediata antifúngica frente *Fusarium graminearum*, *F. incarnatum*, *Colletotrichum acutatum* y *C. gloeosporoides*, antibacteriana frente *Ralstonia solanacearum*, nematocida frente *Meloidogyne incognita* inhibidor del protista causante de la hernia de la col, *Plasmodiophora brassicae* (Peng et al., 2013, p. 594).

c. *Rhizobium sp*

Este género de bacterias también son promotoras del crecimiento en las plantas (PGPRs), son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico, solubilizar fosfatos, generar hormonas responsables del crecimiento de las plantas como auxinas y sideróforos, una vez que han desarrollado una relación simbiótica con las leguminosas a las que provee estos beneficios, son capaces de liberar cianuro de hidrógeno en forma gaseosa al suelo, frenando el crecimiento adyacente de malas hierbas, de la misma manera son capaces de estimular en las plantas una resistencia sistémica ante los múltiples agentes patógenos (Baba y otros, 2015, p. 423). Por otra parte, son capaces de estimular en la planta tolerancia ante el estrés salino (Elsheikh, 2015, p. 143) y sequía (Rasaei et al., 2013, p. 1775). El papel de la microbiota presente en los

excrementos del *T. molitor* como microorganismos inhibidores del crecimiento y desarrollo de patógenos han dado resultados satisfactorios en su lucha frente fitopatógenos como *Ralstonia solanacearum*, *Pectobacterium carotovorum*, *Phytophthora cactorum*, *Fusarium oxysporum* f. *sp. melonis* y *Rhizoctonia solani* (Poveda, 2017, p. 12).

2.2.6. Mecanismos de biodegradación de microorganismos a los polímeros (plásticos)

La biodegradación es un fenómeno natural que implica la descomposición de un material en dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), agua (H₂O) y compuestos orgánicos debido a la actividad enzimática de los microorganismos. Se caracteriza por la asimilación de los polímeros por parte de organismos vivos, con la colonización de bacterias y hongos en la superficie del polímero. Este proceso está influenciado por factores como la tensión superficial, porosidad y textura superficial del polímero, que alteran su estructura física o química, reduciendo su peso molecular. Estas modificaciones pueden ser no deseadas, como los cambios durante el uso, o deseables, como en el caso de la biodegradación, y están principalmente determinadas por la composición química de los polímeros (Barbaran et al., 2018, p. 12).

La degradación de polímeros por parte de microorganismos se ve facilitada cuando los polímeros poseen una estructura química más simple. Esta característica es crucial debido a que un mecanismo de degradación eficiente permite que los microorganismos conviertan los compuestos complejos en formas más simples y utilicen estos productos resultantes como fuente de energía o nutrientes. Un microorganismo inicia el proceso de degradación, primero debe ser capaz de crecer en presencia del compuesto polimérico. Durante este proceso de crecimiento, el microorganismo modifica el polímero, descomponiéndolo en unidades más simples en su composición química. Por lo tanto, la capacidad de un microorganismo para degradar eficientemente polímeros está intrínsecamente ligada a la estructura química del polímero y a la

capacidad del microorganismo para utilizarlo como fuente de carbono y energía (Alexander, 1999, p. 20).

Los microorganismos emplean mecanismos metabólicos, bioquímicos y enzimáticos para degradar polímeros hasta su mineralización, convirtiéndolos en dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). Estas enzimas, específicas de cada especie y cepa, limitan la capacidad de degradar ciertos polímeros. Los microorganismos y sus enzimas juegan un rol crucial en la biodegradación de plásticos como el polietileno de tereftalato (PET). La degradación se observa en la reducción de peso, pérdida de fuerza mecánica y alteraciones superficiales. El objetivo es convertir los desechos en compuestos de bajo peso molecular, facilitando su integración en los ciclos biogeoquímicos (Amobonye et al., 2020, p. 145).

El principal mecanismo implicado en la biodegradación radica en la adhesión de los microorganismos a la superficie del polímero, seguida de su colonización y la participación de enzimas. Implica la unión de la enzima a su sustrato, seguida de la hidrólisis. La etapa inicial de unión o adsorción de la enzima a la superficie del sustrato para formar el complejo enzima-sustrato se considera la etapa limitante de las reacciones de despolimerización, ya que es más lenta que la reacción de hidrólisis (Ahmed et al., 2018, p. 7290).

El proceso de biodegradación se inicia con la colonización y adherencia del polímero por parte de los microorganismos, lo que disminuye la resistencia y durabilidad del plástico y facilita la acción microbiana. La bioaccesibilidad del plástico, es decir, su capacidad de ser colonizado por microorganismos, es crucial para este proceso (Nauendorf et al., 2016, p. 170).

Durante la hidrólisis o despolimerización, los polímeros grandes son degradados en moléculas de bajo peso molecular, como monómeros y dímeros, mediante la acción de

exoenzimas y radicales libres producidos por los microorganismos. Estas exoenzimas, como lacasa, peroxidasa, lipasa, esterasa y cutinasa, actúan principalmente en la interfaz líquida/sólido del plástico, reduciendo su peso molecular y oxidando las moléculas de bajo peso molecular para facilitar el ataque enzimático (Restrepo et al., 2014, p. 85).

Las enzimas microbianas hidrolizan enlaces glucosídicos, éster y peptídicos mediante un ataque nucleofílico, generando diferentes productos. La exohidrólisis produce sustancias como etilenglicol o tereftalato, asimilables directamente por el microorganismo, mientras que la endohidrólisis produce oligómeros que deben seguir degradándose para su asimilación (Gravouil et al., 2017, p. 5153).

Los compuestos de bajo peso molecular producidos durante la biofragmentación son interiorizados en el citoplasma del microorganismo mediante asimilación, donde se inician las rutas metabólicas degradativas típicas. Estas rutas pueden conducir a la mineralización de los productos hasta obtener metabolitos completamente oxidados, como CO_2 , N_2 , CH_4 y H_2O , o a la síntesis de nuevos compuestos útiles para el microorganismo. La biodegradación puede ocurrir en condiciones aeróbicas o anaeróbicas, utilizando diferentes aceptores de electrones en el proceso de hidrólisis (Amobonye et al., 2020, p. 4; Danso et al., 2019, p. 16).

2.2.7. Teoría del polímero

Los polímeros son estructuras monoméricas que se enlazan unas a otras a través de reacciones consecutivas de polimerización, la unión de estas unidades monoméricas a lo largo de la molécula se denominan unidad monomérica (UM). Sin embargo, para que un monómero se considere tal cual, este debe tener una funcionalidad específica, esta va depender de sus grupos funcionales que conforman a la molécula (López Carrasquero, 2004, p. 24)

2.2.7.1. Tipos de plástico

Tabla 2

Plásticos catalogados a nivel mundial

Código de reciclado	Propiedades	Aplicaciones	Posibles organismos que lo degradan
1. PET	Tereftalato polietileno (PETE, PET): también conocido como poliéster. Es un tipo de plástico transparente, tiene propiedades que sirve como barrera del gas y a la humedad dureza y resistencia al calor.	Es frecuente encontrarlo en botellas de bebidas especialmente en agua, envases de productos perecederos como mantequilla, salsas y comida precocinada en horno.	Bacterias: <i>Ideonella sakaiensis</i> Hongos: <i>Aspergillus tubingensis</i>
2. HDPE	Polietileno de alta densidad: tiene resistencia al ataque químico y a la humedad, permeabilidad al gas y es de fácil proceso.	Se usa en bases de leche, refrescos, cosméticos, detergentes y bolsas de envases.	Hongos: <i>Fusarium rodolens</i> , <i>Acremonium kiliense</i> , <i>Aspergillus versicolor</i> y <i>Verticillium lecanii</i>
3. V	Cloruro de polivinilo: PVC presenta una excelente resistencia al ataque químico, exposición solar, calor, buen aislante, y gran resistencia mecánica.	Se encuentra en botellas y todo tipo de envases transparentes, tuberías, carpintería y construcción.	Hongo: <i>Fusarium Culmorum</i>
4. LDPE	Polietileno de baja densidad: es resistente, su transparencia es media, presenta flexibilidad, barrera a la humedad, facilidad de procesado y sellado.	se usa para elaborar tapas flexibles para envases, todo tipo de bolsas para comida y fundas de ropa	Bacterias: <i>Acinetobacter</i> ; <i>Acanthopleurob acter</i> ; <i>Achromobacter</i> ; <i>Basillus</i> , <i>Eschericha</i> ; <i>Enterobacter</i> ; <i>Micrococcus</i> ; <i>Pseudomonas</i> . Hongos: <i>Alternaria</i> , <i>Aspergillus</i> ; <i>Aureobasidium</i> .
5. PP	Polipropileno: presenta buena resistencia química, alto punto de fusión y por tanto resistencia al calor, alta dureza y buena barrera a la humedad.	Se encuentra en los Juguetes para niños, vasos de plástico, piezas de automóvil, ropa y electrodomésticos	Bacteria: <i>pseudomonas</i> ; Hongos: <i>Bacillus</i>
6. EPS	Poliestireno: este tipo de plástico puede ser rígido o expandido, presenta alta transparencia, además tiene propiedades aislantes y facilidad del proceso.	Se puede encontrar en envases, bandejas, vasos desechables, táperes de un solo uso.	Bacterias: <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Staphylococcus sp</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> . Hongos: <i>Bacillus</i>
7. OTROS	Utilizados en distintos materiales diferentes a los anteriores.	Se puede presentar en todo tipo de recipientes.	-----

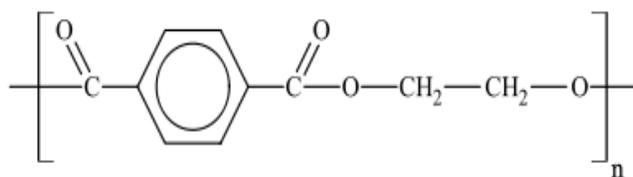
Nota: adaptada de Ortiz (2017)

2.2.7.2. Teoría del tereftalato de polietileno (PET)

El polietileno de tereftalato (PET) es un polímero derivado del petróleo, conocido por su resistencia y estructura cristalina debido a su rápido enfriamiento, lo que lo hace transparente y permite la transmisión de la luz. Sus unidades monoméricas se unen mediante enlaces intermoleculares, lo que le confiere flexibilidad y resistencia incluso a altas temperaturas. (Meza y Pérez, 2015, p. 35).

El polietileno de tereftalato (PET) es un polímero termoplástico sintético fabricado a partir de ácido terftálico (PTA) y etilenglicol (EG), o dimetiltereftalato (DMT). Este material se distingue por su baja velocidad de cristalización y su capacidad para existir en estados amorfo-transparente o cristalino. Caracterizado por su extrema dureza, estabilidad dimensional, y comportamiento termoplástico, el PET es apto para diversos procesos de transformación, como extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado. Destaca por su pureza, resistencia y tenacidad, así como por sus propiedades de transparencia y resistencia química, según su orientación. El PET es el polímero con la estructura química más simple en comparación con el resto de polímeros, es inerte ante ácidos y gases atmosféricos, resistente al calor y a la absorción de agua, y puede formar fibras y películas robustas y flexibles. Con un alto punto de fusión, facilita su procesamiento (García Sánchez, 2017, p. 25).

Formula química: $(C_2H_4)_n$

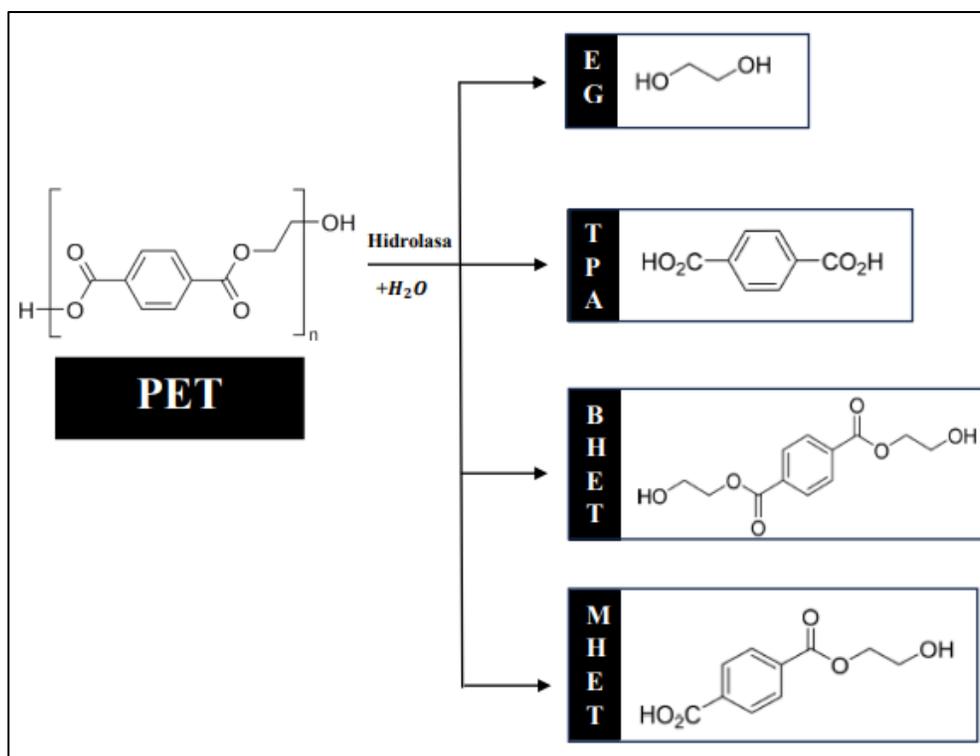


Sin embargo, la resistencia y durabilidad del PET también pueden presentar desafíos en su degradación ambiental. A pesar de su estructura cristalina y resistencia a la corrosión, el PET es susceptible a la degradación biológica y abiótica en el medio ambiente. La baja velocidad de cristalización del PET puede influir en su degradación, debido a su menor densidad tiene una mayor superficie específica, lo que impulsa su degradación, ya que las áreas amorfas son más susceptibles a la acción de microorganismos y factores ambientales. Además, su estabilidad dimensional y su resistencia a la absorción de agua pueden prolongar su persistencia en el entorno, dificultando su biodegradación, comprender cómo estas características influyen en el proceso de degradación del PET es fundamental para abordar los desafíos asociados con su gestión ambiental y su impacto en los ecosistemas naturales (Estrada Flores, 2011, p. 4, 5).

Durante el proceso de biodegradación, se observan cambios en las propiedades fisicoquímicas del PET, como la pérdida de peso, la reducción de la fuerza mecánica y la aparición de alteraciones en su superficie. Estos cambios son el resultado de la acción enzimática de los microorganismos y la posterior fragmentación del material polimérico. La tasa de biodegradación se puede ver afectada por el tamaño y la forma de las partículas de PET, ya que una mayor superficie de exposición facilita la acción microbiana. Además, la interacción entre los microorganismos y los polímeros puede generar productos intermedios, que podrían influir en la velocidad y la eficiencia del proceso. Es importante tener en cuenta que la biodegradación del PET puede ser influenciada por una variedad de factores, como la composición química del material, la presencia de agentes antimicrobianos, la temperatura y la humedad del entorno, y la disponibilidad de oxígeno, comprender los mecanismos y las condiciones que afectan la biodegradación del PET es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de gestión de residuos y mitigar su impacto ambiental. (Campos Granados, 2021, p. 18).

Figura 2

Estructura química del PET y sus productos de degradación



Nota: estructura química del PET (polietileno tereftalato) y sus productos de degradación: etilenglicol (EG), ácido tereftálico (TPA), bis(hidroxietyl) tereftalato (BHET) y mono(hidroxietyl) tereftalato (MHET), generados mediante hidrólisis (Millán y Jiménez, 2023, p. 6).

2.2.7.3. Poliestireno (EPS)

Es un tipo de espuma plástica económica, muy resistente y frecuentemente es confundida con el polietileno (PET), por lo que es un material de naturaleza termoplástica blanquecina, de transparente a translúcido, a menudo es fabricado en delgadas hojas translúcidas, los elementos gruesos son transparentes y su forma que presenta es de cera, a través de la utilización de pintura, se puede lograr un sinfín de productos de colores. Con este polímero plástico se elaboran los empaques de establecimientos, las botellas de shampoo inclusive chalecos a prueba de balas (Ocles Gudiño, 2017, p. 84)

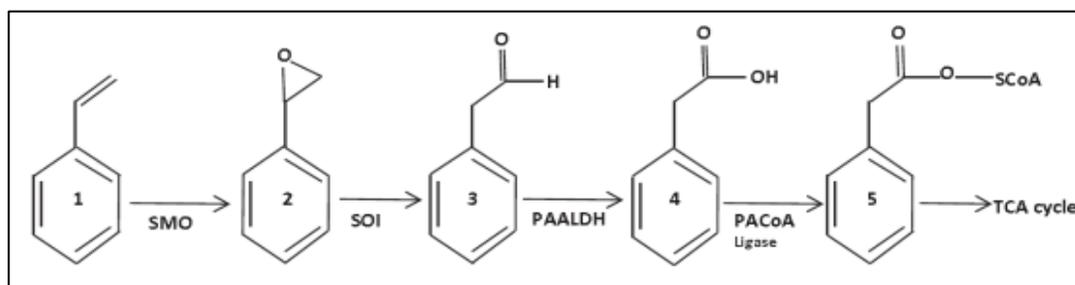
Formula química: $(C_8H_8)_n$



La biodegradación inicia con el crecimiento de microorganismos en su superficie, los cuales secretan enzimas para descomponer el polímero en fragmentos moleculares más pequeños, como oligómeros y monómeros. Se ha observado que el estireno, componente del poliestireno, puede ser utilizado como fuente de carbono por algunos microorganismos. Se ha demostrado la formación de biopelículas en el poliestireno y su degradación parcial por parte de ciertas bacterias. Aunque existen varias rutas metabólicas para el catabolismo del estireno, una vía predominante involucra su oxidación a ácido fenilacético, el cual se convierte en acetil-CoA y entra al ciclo de Krebs para la producción de energía a nivel mitocondrial. Se ha identificado microbiota capaz de degradar poliestireno (Danso et al., 2019, p. 17).

Figura 3

Ruta de degradación del estireno



Nota: (1: estireno, 2: óxido de estireno, 3: Fenil acetaldehído, 4: Ácido fenilacético, 5: Fenilacetil coenzima A ligasa); Enzimas: SMO: Estireno monooxigenasa, SOI: Óxido de estireno isomerasa, PAALDH: fenilacetaldehído deshidrogenasa, PACoA ligasa: Fenilacetil coenzima A ligasa (Portocarrero Estrada, 2021, p. 43)

2.2.7.4. Problemática ambiental de los plásticos (tereftalato de polietileno y poliestireno)

Cada año se producen 430 millones de toneladas métricas de plástico a nivel mundial, de las cuales dos tercios son fabricados para productos de un solo uso, como bolsas, sorbetes y envases de tecnopor. Este plástico puede tardar miles de años en degradarse de forma natural, acumulándose anualmente entre 19 y 23 millones de toneladas en lagos, ríos y mares. Al fragmentarse, genera microplásticos de menos de 5 mm, que contaminan alimentos, agua y aire. Según estudios, las personas ingieren más de 50 000 partículas plásticas al año y exponen su salud a riesgos mayores, exacerbando un problema crítico de contaminación global (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2024 p. 2).

Los polímeros, siendo productos derivados de hidrocarburos, conllevan un impacto ambiental sostenido y duradero debido a su prolongada resistencia a la degradación, resultado de su compleja estructura molecular. Este atributo molecular les confiere una estabilidad excepcional, lo que dificulta su reintegración en los entornos naturales, extendiendo su permanencia en el medio ambiente durante largos períodos, en algunos casos, hasta por centenares de años. Durante este proceso de descomposición, los plásticos liberan compuestos químicos tóxicos, como los bifenilos policlorados, que contaminan los entornos donde se acumulan, exacerbando aún más su impacto negativo en los ecosistemas (García, 2009, p. 78).

La problemática ambiental asociada al tereftalato de polietileno radica en su persistencia en el medio ambiente debido a su estructura molecular y a las propiedades físicas que le confieren. Los plásticos están compuestos por resinas sintéticas derivadas del petróleo, las cuales se conforman en largas cadenas macromoleculares ricas en carbono e hidrógeno. Estas cadenas, junto con la presencia de aditivos que modifican sus propiedades, hacen que los plásticos sean flexibles, duraderos, livianos, versátiles y de bajo costo. La dificultad para su descomposición se

debe a esta compleja estructura molecular, que varía dependiendo de la asociación del carbono con hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. El PET se dividen en termoplásticos, que se ablandan al calentarse y se endurecen al enfriarse, y termoestables, que mantienen una forma permanente tras ser sometidos a calor y presión. Esta resistencia a la descomposición y su presencia en el medio ambiente representan una problemática ambiental significativa, ya que generan contaminación y afectan negativamente a los ecosistemas (Chunga y Cieza, 2016, p. 8).

Una problemática ambiental relevante relacionada con el poliestireno se atribuye a su durabilidad y resistencia inherentes, atribuidas a su estructura molecular. El poliestireno, un polímero sintético derivado del estireno, exhibe una alta estabilidad química y física debido a las largas cadenas de monómeros que lo componen. Esta estabilidad molecular lo hace intrínsecamente resistente a la degradación biológica y química en condiciones ambientales típicas. Como consecuencia, los productos de poliestireno pueden persistir en el medio ambiente durante períodos prolongados, contribuyendo a la acumulación de desechos plásticos y a la contaminación del entorno. Además, la descomposición gradual del poliestireno en microplásticos amplifica su impacto negativo, ya que estas diminutas partículas pueden ser ingeridas por la fauna marina y terrestre, generando repercusiones en los ecosistemas y en la salud de los organismos (Martínez y Canepa, 2001, p. 6).

2.2.7.5. Impactos sociales y sobre la salud

Las partículas de poliestireno tienen elementos químicos tóxicos como por ejemplo el estireno y benceno. Los dos elementos son considerados tóxicos perjudiciales ya logran producir dificultades al bienestar de las personas, incorporando impactos dañinos hacia el sistema nervioso, pulmonar y reproductivo, y tal vez en los riñones e hígado. Diversas investigaciones demostraron que las sustancias tóxicas en los envases de espuma de poliestireno puede ser

traspasado a la comida y los refrescos, y el riesgo puede crecer una vez que las personas calientan los alimentos en este recipiente. En las comunidades que tienen baja demanda, la basura doméstica, incluyendo los plásticos, constantemente son incinerados para encender y/o cocinar, exponiendo especialmente a las mujeres y a los pequeños a los gases tóxicos. Los procedimientos y tratamientos ilícitos de distribución suelen incinerar a aire libre los residuos plásticos acrecentando la liberación de sustancias tóxicas como el furano y la dioxina (ONU, 2018, p. 14).

2.2.7.6. Biorremediación

La biorremediación emerge como una estrategia científica y técnica de vanguardia para la degradación controlada de polímeros sintéticos. Este enfoque implica la aplicación de técnicas y métodos biológicos dirigidos a la mitigación de contaminantes o sustancias tóxicas mediante la utilización de cepas microbianas especializadas. La esencia de la biorremediación radica en su capacidad para fomentar y acelerar los ciclos biológicos naturales, permitiendo así la descomposición eficiente y específica de los polímeros, con el objetivo último de restablecer el equilibrio ambiental (Ccallo y Sacaca, 2020, p. 12).

La biorremediación o biodegradación es un proceso metabólico y enzimático llevado a cabo por microorganismos, como bacterias y ciertos hongos. Estos microorganismos segregan enzimas que descomponen la estructura molecular del plástico, reduciendo gradualmente su masa a lo largo del tiempo. Este proceso es reconocido y respaldado por la comunidad científica debido a su eficacia. Los microorganismos atacan la superficie del plástico y lo utilizan como fuente de carbono para su propio crecimiento, consumiéndolo y degradándolo en el proceso, ya sea en condiciones aeróbicas o anaeróbicas (Arutchelvi et al., 2008, p. 10).

Velocidad de biodegradación. La velocidad de biodegradación se refiere a la tasa a la cual un material es descompuesto por los microorganismos presentes en un determinado medio ambiente. En la mayoría de las aplicaciones, esta velocidad se establece midiendo la velocidad de desaparición de uno o más reactivos, o cuantificando la aparición de un producto de reacción. Adicionalmente, algunas reacciones de deterioro, como la biodegradación de plásticos, se describen mejor mediante la relación lineal entre la concentración de un producto y el tiempo. Esta medición puede realizarse mediante diferentes parámetros, tales como la cantidad de material descompuesto por unidad de tiempo o la cinética de la descomposición (Heldman, 2011, p. 682).

La ecuación asociada a esta metodología es el método de seguimiento de la pérdida de masa:

$$\text{Velocidad de degradación} = \frac{\text{masa inicial (g)} - \text{masa final (g)}}{\text{masa inicial (Kg)} \times \text{tiempo}}$$

2.3. Definición de términos básicos.

2.3.1. Biodegradación

“Se entiende por biodegradación a una clase de degradación generada por microbios óxicos o anóxicos con la capacidad de asimilar polímeros y sustancias orgánicas e inorgánicas con el propósito de eliminar algún contaminante en el ambiente” (Barbarán et al., 2018 citado en Ccallo et al., 2020, p. 49).

2.3.2. Microorganismos

“Organismos vivos diminutos los cuales no pueden identificarse a simple vista y están presentes en los ecosistemas e interrelacionándose entre ellos, los más cuantiosos son: las

bacterias, también las levaduras, hongos, protozoos, etc. estos son usados en la biotecnología” (Madigan et al., 2015, p. 120).

2.3.3. Microbiota

Conjunto de microorganismos, incluyendo bacterias, virus, hongos y protozoos, que habitan en un entorno específico, como el cuerpo humano o el suelo. Puede encontrarse en diversas partes del cuerpo, como el intestino, la piel, la boca y el tracto respiratorio (Alarcón et al., 2016, p. 5)

2.3.4. Enzimas

Son proteínas compuestas por cadenas de aminoácidos enlazados mediante enlaces covalentes, y facilitan una amplia gama de reacciones químicas en los organismos. La capacidad de las enzimas para catalizar estas reacciones depende de la conservación de su estructura tridimensional, o su plegamiento adecuado (Ramírez y Ayala, 2014, p. 2).

2.3.5. Polímeros

Son macromoléculas compuestas por la repetición de monómeros unidos por enlaces covalentes. Pueden ser naturales o sintéticos y se distinguen por su alta masa molecular y sus propiedades dependientes de la estructura de los monómeros (Torres García, 1999, p. 56).

2.3.6. Monómeros

Molécula simple que sirve como unidad básica para la síntesis de polímeros a través de reacciones de polimerización. Estos compuestos químicos iniciales se enlazan covalentemente en cadenas largas o estructuras tridimensionales (Mier et al., 1997, p. 12)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización de la investigación

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el distrito de Celendín, provincia de Celendín y departamento de Cajamarca, Perú. En el laboratorio de Biología de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería ambiental de la Universidad Nacional de Cajamarca, ver figura 4.

- **coordenadas geográficas**

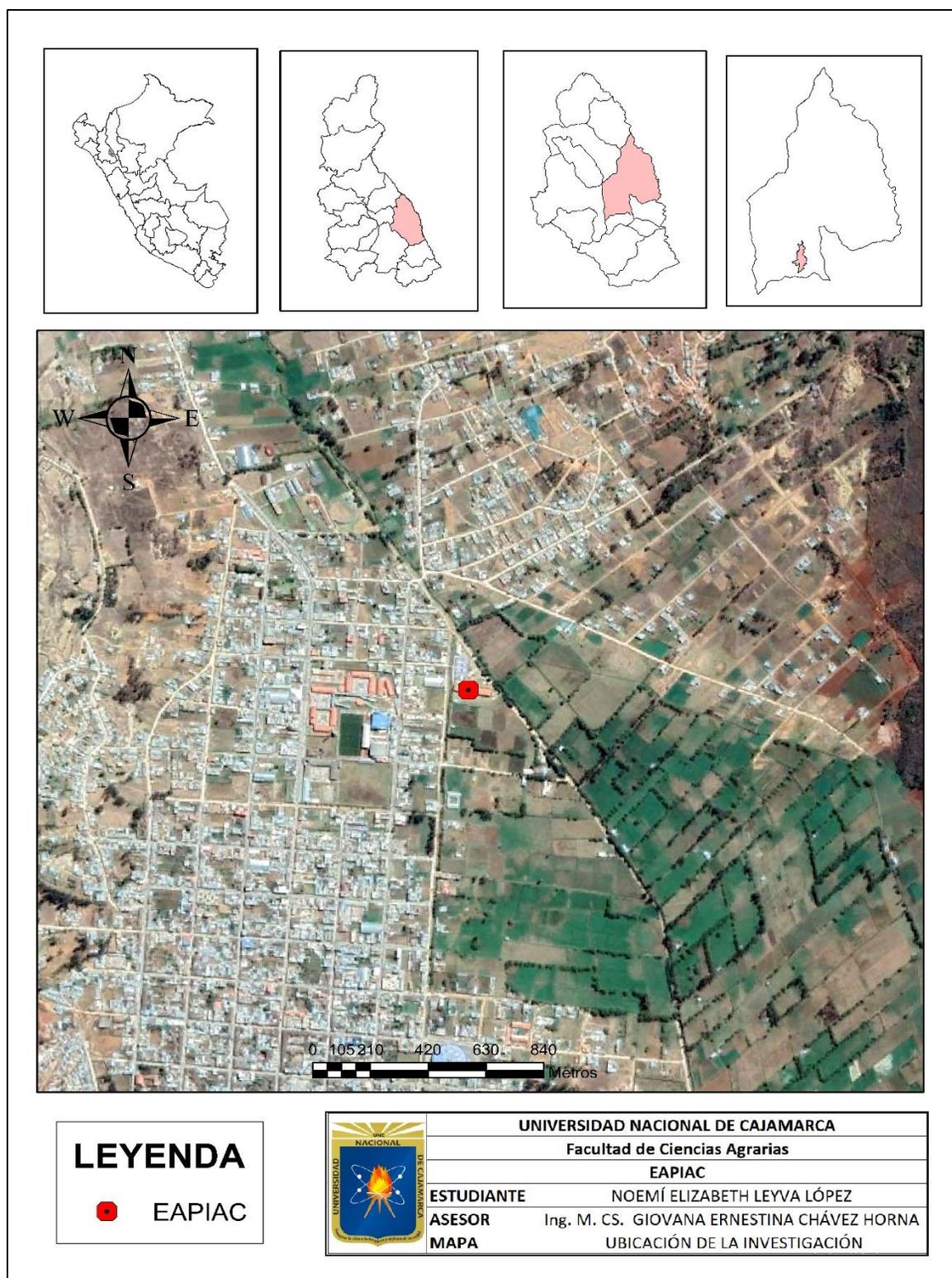
Latitud Sur: 6° 51' 10.9"

Longitud Oeste: 78° 8 '41.5"

Altitud: 2607 m s.n.m.

Figura 4

Ubicación geográfica de la investigación



3.2. Material experimental

- Dos tratamientos: líquido ruminal vacuno y Gusano de harina (*Tenebrio molitor*).
- Tereftalato de polietileno (PET)
- Poliestireno (EPS)

a) Materiales

- Matraz
- Frascos de vidrio
- Guantes
- Pinzas metálicas, tijeras
- Bandejas de plástico
- Colador
- Plumón indeleble
- pipeta

b) Equipos

- Balanza analítica
- Microscopio
- Estufa
- Incubadora, Termómetro ambiental

3.3. Procedimiento

Se realizaron dos procesos experimentales, utilizando líquido ruminal vacuno y larvas de *T. molitor* (gusano de la harina), con el objetivo de determinar la degradación de dos tipos de polímeros, tereftalato de polietileno (PET) y poliestireno (EPS), a lo largo de 4 intervalos de tiempo de 30, 60, 90 y 120 días, ver figura 5.

Figura 5

Diseño experimental y arreglo de los tratamientos.

<u>TIEMPO 30 DÍAS</u>	<u>TIEMPO 60 DÍAS</u>	<u>TIEMPO 90 DÍAS</u>	<u>TIEMPO 120 DÍAS</u>
Líquido ruminal +PET (24° C, Hr) PET: 0.2109 g	Líquido ruminal +PET (24° C, Hr) PET: 0.2050 g	Líquido ruminal +PET (24° C, Hr) PET: 0.2159 g	Líquido ruminal +PET (24° C, Hr) PET: 0.2117 g
			
250 mL de líquido	250 mL de líquido	250 mL de líquido	250 mL de líquido
Líquido ruminal +EPS (24° C, Hr) EPS: 0.0638 g	Líquido ruminal +EPS (24° C, Hr) EPS: 0.0665 g	Líquido ruminal +EPS (24° C, Hr) EPS: 0.0854 g	Líquido ruminal +EPS (24° C, Hr) EPS: 0.0765 g
			
250 mL de líquido	250 mL de líquido	250 mL de líquido	250 mL de líquido
Tenebrio molitor + PET PET: 0.1933 g	Tenebrio molitor + PET PET: 0.2255 g	Tenebrio molitor + PET PET: 0.2341 g	Tenebrio molitor + PET PET: 0.2042 g
			
30 larvas de tenebrio molitor	30 larvas de tenebrio molitor	30 larvas de tenebrio molitor	30 larvas de tenebrio molitor
Tenebrio molitor + EPS EPS: 0.0912 g	Tenebrio molitor + EPS EPS: 0.08072 g	Tenebrio molitor + EPS EPS: 0.09050 g	Tenebrio molitor + EPS EPS: 0.09050 g
			
30 larvas de tenebrio molitor	30 larvas de tenebrio molitor	30 larvas de tenebrio molitor	30 larvas de tenebrio molitor

Nota: Diseño experimental con intervalos de tiempo de 30, 60, 90 y 120 días, incluyendo procesos experimentales con líquidos y *T. molitor*. Fuente: Elaboración propia.

Para la ejecución se siguió el siguiente procedimiento:

- Se preparó el tereftalato de polietileno y el poliestireno para la evaluación experimental, realizando recortes con dimensiones específicas de 2.5 cm x 2.5 cm, según lo indicado por Meza y Pérez (2015).

Figura 6

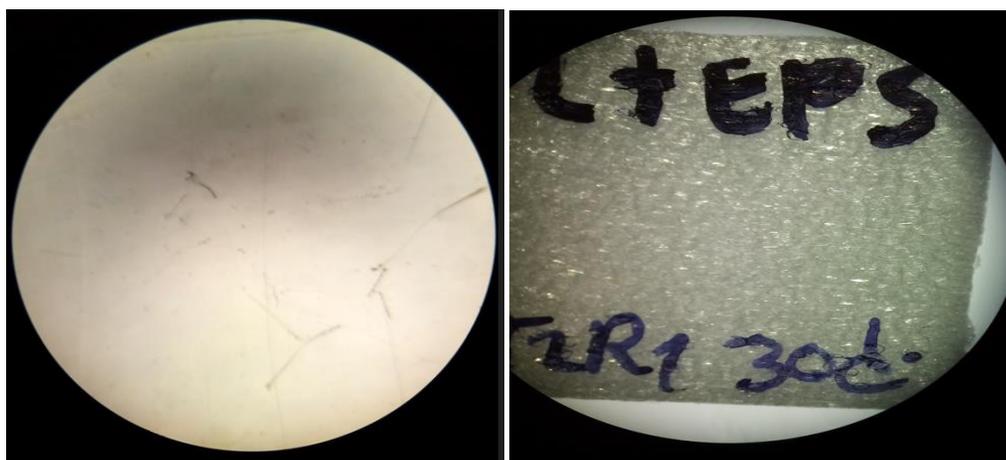
Preparación del tereftalato de polietileno y el poliestireno



- Previo a la aplicación del tratamiento, las placas de tereftalato de polietileno y poliestireno fueron observadas en el microscopio, se observó que presentaban un color, textura típicos de su estado inicial; estaban intactas, sin deformaciones, agujeros u otras irregularidades visibles.

Figura 7

Observación en el microscopio de las láminas de PET y EPS antes del tratamiento a: PET, b: EPS



a

b

- Determinación del peso inicial del PET, se pesó las láminas de 2.5cm x 2.5 cm en la balanza analítica, se obtuvo pesos que oscilaron entre 0.1823 - 0.2345 g, antes de ser ubicadas en los frascos con los tratamientos.
- Determinación del peso inicial del EPS, se pesó las láminas de 2.5cm x 2.5 cm en la balanza analítica, se obtuvo pesos que oscilaron entre 0.0638 – 0.0912 g, antes de ser ubicadas en los frascos con los tratamientos.

Figura 8

Determinación de peso del PET y EPS antes de aplicar los tratamientos



- El tratamiento con líquido ruminal vacuno, las láminas se colocaron en 8 frascos, 4 con PET y 4 con EPS, conteniendo 250 ml de líquido ruminal, con pH de 6.5, fueron cerrados herméticamente, y se pusieron a incubación a 24 °C, durante el tiempo de monitoreo (30, 60, 90 y 120 días), figura 9.

- El tratamiento con *Tenebrio molitor*, las láminas fueron colocadas en 8 frascos conteniendo 30 larvas de *T. molitor*, 4 con PET y 4 con EPS, luego fueron cerrados con una malla para ser incubados a 24 °C, durante el tiempo de monitoreo (30, 60, 90 y 120 días), figura 9.
- Se registró el porcentaje de humedad relativa de ambos tratamientos en la incubadora, se encontró en un rango de 32% a 37 %, para controlar las condiciones óptimas de biodegradación. Esto garantizó que los microorganismos biodegradadores puedan prosperar adecuadamente.

Figura 9

Incubación de los frascos con los tratamientos



- Tras el período establecido, se desinfectaron las láminas con una solución de lejía al 1%, figura10, siguiendo el protocolo de Chunga y Cieza (2016).

Figura 10

Extracción y lavado de las laminas



- Posteriormente, se secaron en la estufa a 37 °C por 24 horas, y se observaron en el microscopio:
- Se realizó una observación visual del progreso de la biodegradación de los polímeros tratados. En el caso del tereftalato de polietileno (PET) expuesto al líquido ruminal, se registraron variaciones en la textura y el color, así como pequeñas corrosiones; por otro lado, las láminas tratadas con *Tenebrio molitor* se mantuvieron prácticamente intactas (ver figura 11 a). En cuanto al poliestireno (EPS), se evidenciaron cambios significativos en la textura, con la aparición de agujeros y deformaciones cuando se empleó *Tenebrio molitor*, mientras que las láminas tratadas con líquido ruminal no mostraron variaciones marcadas en su textura (ver figura 11 b).

Figura 11

Observación en el microscopio después de los tratamientos, a: PET y b: EPS



- Se realizó el pesado final, donde se registró la masa final de las láminas cada 30 días.
- Capacidad de biodegradación: para evaluar la capacidad de biodegradación se registró la reducción de la masa de las láminas del EPS y PET durante el tiempo de (30, 60, 90 y 120 días)

3.4.Tratamiento y análisis de datos

Las masas de las láminas de EPS y PET se determinaron por el método gravimétrico a través de una balanza analítica y se registró en valores porcentuales. Esta prueba estableció la variación directa de las masas del poliestireno y tereftalato de polietileno que fueron sometidas a las condiciones de biodegradación. El principio básico de la pérdida de la masa es la adherencia de los microorganismos al EPS y al PET. El procedimiento consistió en pesar con una balanza analítica (con sensibilidad 0.1 mg), el material antes y después de realizar una prueba de cultivo (Acuña Molina, 2017).

Las láminas de EPS y PET lavadas se colocaron sobre papel toalla estéril y se dejó secar durante una noche a temperatura ambiente antes de determinar los pesos por método gravimétrico en balanza analítica, finalmente la masa obtenida se contrastó con la masa inicial y se estimó el % de masa perdida mediante la siguiente fórmula (Das y Santosh, 2015).

$$\% \text{ de masa perdida} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa inicial}} \times 100$$

Para la determinación de la velocidad de reacción biológica se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Velocidad de degradación} = \frac{\text{masa inicial (g)} - \text{masa final (g)}}{\text{masa inicial (Kg)} \times \text{tiempo}}$$

Para determinar el nivel de significancia se usó el software excel. Mediante un análisis de la varianza ANOVA.

Tabla 3

Análisis de varianza

Fuente de Variación (F.V.)	Suma de Cuadrados (S.C.)	Grados de Libertad (g.l.)	Cuadrados Medios (C.M.)	F_o
Tratamientos	$SC_{TRATAMIENTOS}$	K - 1	$\frac{SC_{TRATAMIENTOS}}{K - 1}$	$\frac{SC_{TRATAMIENTOS}}{SC_{ERROR}}$
Error	SC_{ERROR}	N - K	$\frac{SC_{ERROR}}{N - K}$	
Total	SC_{TOTAL}	N - 1	—	

Fuente: (Cervantes y Marques, 2007, como se citó en Lozano Díaz, 2023, p. 25)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Velocidad de reacción biológica del cultivo microbiano líquido ruminal vacuno en la degradación del PET y EPS

La Tabla 4 exhibe la velocidad de reacción biológica en muestras de polietileno y poliestireno sometidas a la acción del cultivo microbiano del líquido ruminal vacuno durante cuatro intervalos de tiempo (30, 60, 90 y 120 días), los valores reportados son el promedio de 5 réplicas por cada intervalo de tiempo (datos completos y cálculo de velocidad, ver anexo I), y la media general por polímero degradado.

Tabla 4

Velocidad de reacción biológica del cultivo microbiano líquido ruminal vacuno

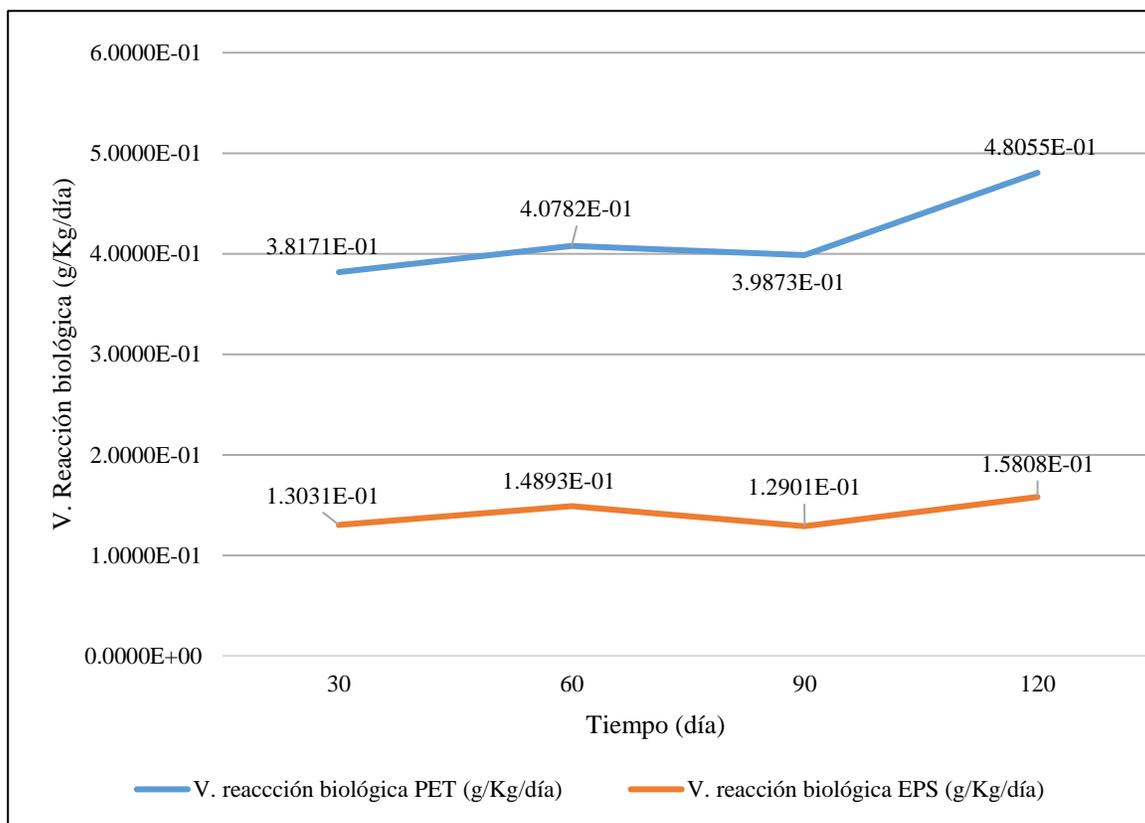
Polímeros	Tiempo (Día)	Velocidad de reacción biológica (g/Kg/día)
Tereftalato de polietileno (PET)	30	3.82×10^{-1}
	60	4.08×10^{-1}
	90	3.99×10^{-1}
	120	4.81×10^{-1}
	\bar{X}	4.17×10^{-1}
Poliestireno (EPS)	30	1.30×10^{-1}
	60	1.49×10^{-1}
	90	1.29×10^{-1}
	120	1.58×10^{-1}
	\bar{X}	1.42×10^{-1}

Al comparar las medias de la velocidad de reacción biológica entre el tereftalato de polietileno (PET) y el poliestireno (EPS), se observa que la media del PET ($\bar{X} = 4.17 \times 10^{-1}$ g/Kg/día) es mayor que la del EPS ($\bar{X} = 1.42 \times 10^{-1}$ g/Kg/día), indicando una tasa de degradación biológica más alta para el PET durante el período de observación. Además, se identifica una relación directamente proporcional entre la degradación y el tiempo para ambos polímeros, la menor degradación se dio a los 30 días y la mayor degradación a los 120 días, lo que confirma que, el tiempo es un crítico influyente, a mayor tiempo de exposición, mayor es la tasa de degradación biológica.

La Figura 12 exhibe la comparación de las velocidades de reacción entre el polietileno y el poliestireno en el entorno del líquido ruminal. Se observa un aumento continuo a medida que avanza el tiempo, lo cual se atribuye a las condiciones de adaptación y reproducción de los microorganismos. Este fenómeno respalda la afirmación de Bermúdez Morera (2021) la degradación es una variable temporal, con una relación directa entre el tiempo y la magnitud de degradación. Además, Palacios y Prado (2018) respaldan la idea de que la degradación está vinculada al factor tiempo, en su estudio menciona que la remoción de los materiales fue nula en los primeros 30 días y alcanzó su máximo a los 90 días. Sin embargo, Ariba et al. (2015) discrepa con esta observación, al afirmar que la velocidad de degradación es mayor en los primeros días y disminuye con el tiempo debido al agotamiento de los sustratos y a cambios en las condiciones ambientales. La velocidad de reacción más alta del polietileno en comparación con el poliestireno, se debe a su estructura química más simple y lineal, lo que lo hace más accesible a los microorganismos y enzimas (Alexander, 1999), (Hernández et al., 2015). Además, el polietileno tiende a tener una mayor superficie específica debido a su menor densidad, lo que puede impulsar su degradación de manera más eficaz (Estrada Flores, 2011).

Figura 12

Velocidad de reacción biológica del líquido ruminal vacuno



Diferencia de la velocidad de reacción biológica del tratamiento con líquido ruminal en la degradación del PET y EPS

La tabla 6 muestra el análisis de la varianza de la velocidad de reacción del líquido ruminal vacuno en la degradación del PET y EPS, se observa el valor calculado de F (109.49) es significativamente mayor que el valor crítico para F (2.312741), considerando un nivel de significancia (alfa) de 0.05, podemos concluir que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las velocidades de reacción biológica del líquido ruminal vacuno en la degradación de PET y EPS.

Tabla 5

Análisis de la varianza ANOVA en función a la velocidad de reacción del líquido ruminal vacuno en la degradación del PET y EPS

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.759411661	7	0.10849	109.49	0.0051	2.312741
Dentro de los grupos	0.031704922	32	0.00099			
Total	0.791116583	39				

Coefficiente de variabilidad (CV)= 11%.

El CV del 11 % menor a 30% indica que la variabilidad de las velocidades de reacción, es relativamente baja en comparación con la media de estas velocidades. La baja variabilidad es positiva, lo que fortalece la validez de los resultados del análisis de varianza. En conjunto con el resultado del que indica una diferencia estadísticamente significativa, El coeficiente de variabilidad del 11 % respalda la conclusión de que las diferencias observadas no son el resultado de la variabilidad aleatoria, sino que son consistentes y sustanciales.

4.2. Velocidad de reacción biológica del gusano de la harina (*Tenebrio molitor*) en la degradación del PET y EPS

La Tabla 5 presenta los resultados de la velocidad de reacción biológica en las muestras de tereftalato de polietileno (PET) y poliestireno (EPS), expuestas a la acción del gusano de la harina (*Tenebrio molitor*) durante cuatro intervalos de tiempo distintos, a saber, 30, 60, 90 y 120 días. Los valores reportados son el promedio de 5 réplicas por cada intervalo de tiempo (datos completos y cálculo de velocidad, ver anexo II), y la media general por polímero degradado.

Tabla 6

Velocidad de reacción del gusano de la harina (Tenebrio molitor)

Polímeros	Tiempo (día)	Velocidad de reacción biológica (g/Kg/día)
Tereftalato de polietileno (PET)	30	3.514×10^{-2}
	60	3.113×10^{-2}
	90	3.782×10^{-2}
	120	5.263×10^{-2}
	\bar{X}	3.918×10^{-2}
Poliestireno (EPS)	30	1.9040
	60	2.5413
	90	2.6192
	120	3.1836
	\bar{X}	2.5620

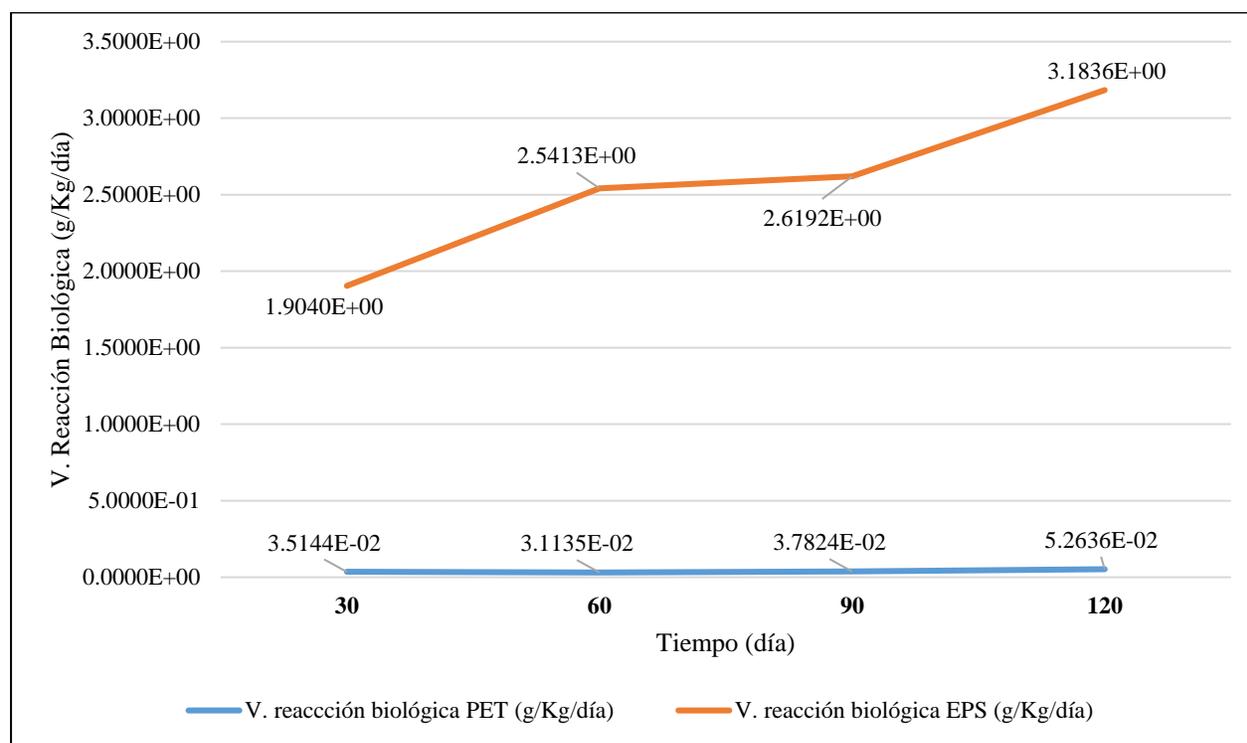
Al comparar la degradación del tereftalato de polietileno (PET) y el poliestireno (EPS) por meses, se observa que, en promedio, la velocidad de reacción biológica del EPS con una media general de 2.5620 g/Kg/día, es mayor que la del PET con una media general de 3.918×10^{-2} g/Kg/día, se observa en ambos polímeros que en el primer mes la degradación fue baja, en comparación con los meses siguientes, se identifica una relación directamente proporcional entre la degradación y el tiempo, lo que implica que a medida que pasa el tiempo, la velocidad de degradación biológica aumenta.

La Figura 13 presenta una comparación de las velocidades de reacción del *Tenebrio molitor* en función al polímero. Se observa que la velocidad de degradación del polietileno es baja en comparación con el poliestireno. Portocarrero Estrada (2021) menciona que esta disparidad se atribuye a la mayor facilidad con la que el *Tenebrio molitor* puede degradar el poliestireno debido a su estructura química más ramificada, que lo vuelve más susceptible a la acción de la degradación microbiana, en comparación con el polietileno los enlaces químicos en el PET son altamente estables y requieren condiciones y enzimas específicas para su

descomposición. Estos hallazgos se corroboran a Alcázar (2020) y Molina et al., (2016), que han señalado que el *Tenebrio molitor* tiene una mayor capacidad de degradación del poliestireno en comparación con el polietileno. Sugieren que esta diferencia en la biodegradación podría estar relacionada con variaciones en las condiciones ambientales y el consumo diferencial entre estos dos polímeros. Además, según López Paredes (2020) y Daviran Yance (2017) destacan que el *Tenebrio molitor* degrada el poliestireno con relativa eficacia, mientras que, en el caso del polietileno, el estudio reveló que el peso inicial se mantuvo similar al peso final con diminuta variación, lo que resulta en una velocidad de reacción baja. Se enfatiza que esta velocidad de degradación depende de múltiples aspectos, incluyendo el tiempo y factores influyentes como la temperatura y la humedad.

Figura 13

Velocidad de reacción biológica del Tenebrio molitor



Diferencia de la velocidad de reacción biológica del tratamiento con *Tenebrio molitor* en la degradación del PET y EPS

La tabla 7 muestra el análisis de la variancia de las velocidades de reacción del *Tenebrio molitor* en la degradación del PET y EPS, el valor de F calculado, que asciende a 70.59117948, denota una variación superior al valor crítico para F (2.31274119), considerando un nivel de significancia (alfa, α) de 0.005. Este resultado indica que las diferencias son altamente significativas desde un punto de vista estadístico.

Tabla 7

Análisis de la varianza ANOVA en función a la velocidad de reacción del Tenebrio molitor en la degradación de PET y EPS

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	63.651262	7	9.09304	70.591179	0.04991	2.31274119
Dentro de los grupos	4.12200504	32	0.12881			
Total	67.7732671	39				

Coefficiente de variabilidad (CV)= 28%

El coeficiente de variabilidad del 28% menor a 30% indica que existe una variabilidad moderada en las velocidades de reacción entre los grupos que están siendo comparados. Este coeficiente proporciona información sobre la dispersión de los datos en relación con la media, indicando que la media es significativa; aunque las diferencias en las velocidades de reacción son estadísticamente significativas, aún existe cierta variabilidad dentro de cada grupo, los datos son relativamente homogéneos.

4.3. Reducción del tereftalato de polietileno y poliestireno

La tabla 8, muestra la masa inicial y final de los polímeros y el porcentaje de eliminación de masa de PET y EPS en función del líquido ruminal vacuno y el *Tenebrio molitor*, durante cuatro intervalos de tiempo distintos: 30, 60, 90 y 120 días. Esta información es fundamental para comprender cómo la eliminación de masa evoluciona a lo largo del tiempo y evaluar la eficacia de los procesos de degradación en cada intervalo de monitoreo.

Tabla 8

Masa inicial y final de los polímeros y su porcentaje de degradación

Cultivo	Tereftalato de polietileno (PET)			Poliestireno (EPS)		
	Masa inicial	Masa final	% Remoción	Masa inicial	Masa final	% Remoción
	0.1933	0.1930	0.11%	0.0912	0.0859	6%
<i>Tenebrio</i>	0.2255	0.2251	0.19%	0.0807	0.0684	15%
<i>molitor</i>	0.2341	0.2333	0.34%	0.0905	0.0691	24%
	0.2042	0.2029	0.63%	0.0905	0.0559	38%
Líquido ruminal vacuno	0.2109	0.2085	1.15%	0.0638	0.0636	0%
	0.2050	0.2000	2.45%	0.0665	0.0659	1%
	0.2159	0.2082	3.59%	0.0854	0.0844	1%
	0.2117	0.1995	5.77%	0.0765	0.0750	2%

La figura 14 se muestra, el tratamiento con líquido ruminal vacuno en la degradación de PET. Se registró una reducción de 1.145% -5.77%, concordando con Damayanti et al. (2020) obtuvieron datos similares de 0.593-1.66% a 15 días, y discrepando con Butrón Pinazo (2020) y Barbarán et al. (2018) obtuvieron 21.7% y 27.3% y 19.93 % de remoción respectivamente. Según Palacios y Prado (2018), esta degradación se atribuye a procesos metabólicos y enzimáticos llevados a cabo por bacterias que secretan enzimas capaces de descomponer la

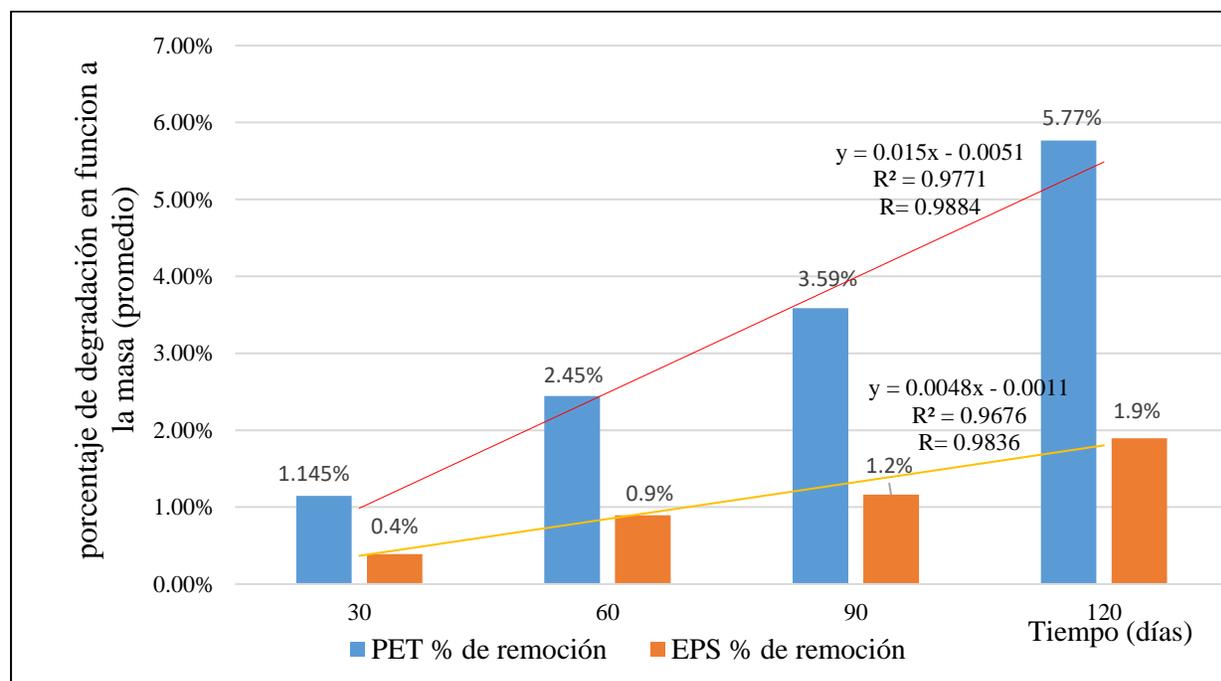
estructura molecular del plástico a lo largo del tiempo. Arciniega Carreón (2008) señala que la presencia de un grupo carbonilo adyacente a un átomo de carbono secundario o terciario favorece la fragmentación del material por microorganismos, y este proceso se ve respaldado por una acción enzimática hidrolítica que conduce a la reducción de cadenas moleculares. Sin embargo, los porcentajes de disminución de polietileno son bajos (5.77%), posiblemente debido al tamaño de las placas utilizadas, como menciona Bermúdez Morera (2021), quien sugiere que partículas de menor tamaño permiten una mayor degradación, quien obtuvo remociones de 13-14%. Al analizar la influencia del tiempo, se evidencia una degradación lenta en los primeros días se confirma que este factor desempeña un papel crucial en la degradación, coincidiendo con la afirmación de Portocarrero Estrada (2021) de que el tiempo tiene un mayor impacto que la concentración bacteriana en el proceso de degradación. Sandoval Navarro (2018) menciona que una degradación lenta se debe a la falta de producción de enzimas recombinantes necesarias para romper los enlaces ester del PET. Utilizando la ecuación de la curva de tendencia $y = 0.015x - 0.0051$, donde “y” representa el porcentaje de degradación del polímero y “x” representa el tiempo en días, se estima que el polímero alcanzará el 100% de degradación en un período proyectado de 18.26 años. El tratamiento del PET con líquido ruminal presenta un coeficiente de correlación cercano a la unidad ($R=0.9884$) que indica una relación muy fuerte y positiva entre el tiempo y el porcentaje de remoción, a mayor tiempo, mayor es la degradación. Asimismo, el coeficiente de determinación ($R^2=0.9771$) muestra que el 97.71% de la variabilidad en la remoción es explicada por el tiempo.

En la degradación de poliestireno, se observa una degradación baja 0.4-1.9%, similar a lo obtenido por Chunga y Cieza (2016) obtuvieron de 0.4 -9.4 % utilizando un consorcio bacteriano a los 90 días. Atribuible a su complejidad de la estructura química más a la dificultad de los

microorganismos para descomponerla (Hernández et al., 2015). Esto se alinea con la idea de que los enlaces químicos en el poliestireno son intrínsecamente más resistentes. Estas observaciones discrepan con el estudio de Gonzáles et al. (2016), que informó una degradación eficiente del 90% en 15 días por parte de microorganismos. Utilizando la ecuación de la curva de tendencia $y = 0.0048x - 0.0011$, donde “y” representa el porcentaje de degradación del polímero y “x” representa el tiempo en días, se estima que el polímero alcanzará el 100% de degradación en un período proyectado de 57.07 años, muestra un coeficiente de correlación cercano a la unidad ($R = 0.9836$) que indica una relación fuerte y positiva entre el tiempo y la remoción, lo que implica que un aumento en el tiempo mejora la degradación. Además, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9776$) sugiere que el 97.76% de la variabilidad en la remoción se explica por el tiempo, lo que resalta su influencia predominante en el proceso de degradación de EPS.

Figura 14

Degradación de los polímeros por el líquido ruminal



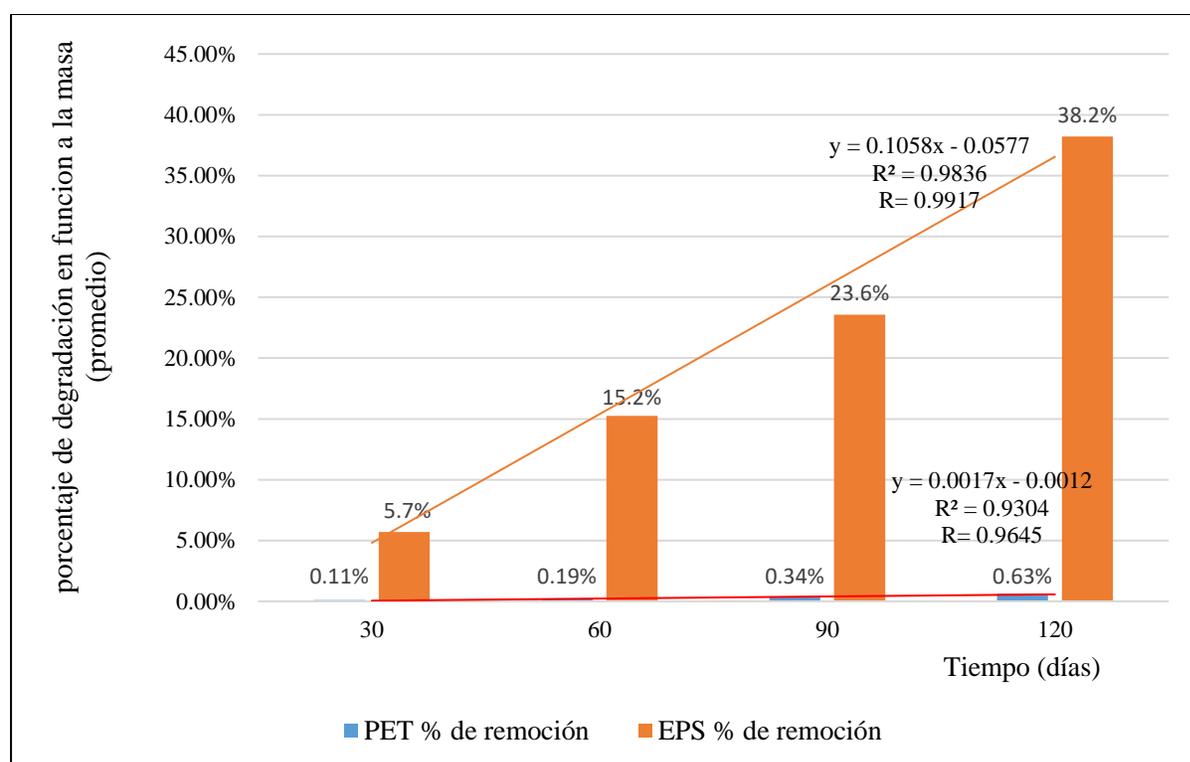
La figura 15 muestra el tratamiento con *Tenebrio molitor*, en la degradación de polietileno de tereftalato PET, se obtuvo valores de remoción bajos de 0.11 -0.63%, asemejándose a lo obtenido por López Paredes (2020) quien menciona que la microbiota del *Tenebrio molitor* nos es capaz de degradar polietileno, en su estudio no hubo variación en la masa inicial y final después del tratamiento con un valor de 0%. Discrepando con Portocarrero Estrada (2021) y Molina et al. (2016) menciona que las larvas de *Tenebrio molitor* degradan con facilidad el polietileno, obtuvieron en periodo corto 5% y 64% de eficiencia respectivamente. Empleando la fórmula de la curva de tendencia $y = 0.0017x - 0.0012$, donde “y” denota el porcentaje de degradación del polímero y “x” el tiempo transcurrido en días, se predice que el polímero experimentará una degradación completa al 100% en un lapso estimado de 161.14 años. El coeficiente de correlación cercano a la unidad $R = 0.9645$ indica una fuerte relación positiva entre el tiempo y la remoción, y $R^2 = 0.9304$ muestra que el 93.04% de la variabilidad en la remoción se explica por el tiempo.

Tratamiento con *Tenebrio molitor* en la degradación de EPS, fue más evidente con valores 5.7- 38.20%, respaldada con los resultados de López Paredes (2020) y Daviran Yance (2017), quienes obtuvieron un 6.34% y 3.92% de degradación respectivamente en solo 10 días. La capacidad de degradación del poliestireno por parte del *Tenebrio molitor* se debe a adaptaciones metabólicas, enzimas especializadas y a la presencia de una microbiota en su tracto digestivo. La masticación del material por el *Tenebrio molitor* aumenta la superficie disponible, lo que facilita la degradación. A pesar de que el poliestireno expandido no proporciona una fuente óptima de nutrientes, el *Tenebrio molitor* ha evolucionado para utilizarlo como fuente de carbono y energía, lo que lo convierte en un eficiente agente de descomposición de este material plástico (Portocarrero Estrada, 2021). Con base en la ecuación de la curva de tendencia $y =$

$0.1058x - 0.0577$, donde “y” representa el porcentaje de degradación del polímero y “x” denota el tiempo transcurrido en días, se proyecta que el polímero alcanzará una degradación completa al 100% en un período proyectado de 2.59 años. En el tratamiento con *Tenebrio molitor* para el EPS, $R=0.9917$ cercano a la unidad indica una relación muy fuerte y positiva entre el tiempo y la remoción, y $R^2=0.9836$ muestra que el 98.36% de la variabilidad en la remoción se explica por el tiempo.

Figura 15

Degradación de los polímeros con el Tenebrio molitor



4.4. Parámetros fisicoquímicos que influyen en los cultivos microbianos

La Tabla 9 muestra los parámetros fisicoquímicos. La temperatura se mantuvo constante a 24 °C, lo cual se encuentra dentro del rango óptimo recomendado en el estudio de López Paredes (2020) estableció condiciones experimentales controladas, con una temperatura mantenida en el

intervalo de 24 a 30 °C. La humedad se mantuvo dentro del rango adecuado, variando entre 32% y 37%, lo cual coincide con el rango óptimo sugerido (30% a 60%). Respecto al pH, se observó que los valores se mantuvieron estables en el intervalo de 6 a 6.5, con mínimas fluctuaciones. Es importante destacar que según la observación de Arciniega Carreón (2008), la degradación microbiana tiende a aumentar en ambientes con pH ácido, aunque en condiciones de pH neutro a ligeramente alcalino, se observó un crecimiento constante sin disminución de los microorganismos.

Tabla 9

Parámetros fisicoquímicos que influyen en los cultivos microbianos

Líquido ruminal vacuno						<i>Tenebrio molitor</i>	
Tereftalato de polietileno			Poliestireno			Tereftalato de polietileno	Poliestireno
Tiempo	Humedad	Potencial de hidrógeno inicio	humedad	Potencial de hidrógeno inicio	final	humedad	humedad
30	33%	6.5	34%	6.49		34%	35%
	35%	6.47	34%	6.5		33%	32%
	36%	6.5	32%	6.48		35%	34%
	34%	6.49	34%	6.5		34%	33%
	33%	6.5	33%	6.5		33%	35%
60	37%	6.5	33%	6.48		35%	32%
	36%	6.45	32%	6.49		33%	33%
	35%	6.48	34%	6.5		34%	34%
	37%	6.49	33%	6.47		37%	37%
	37%	6.5	35%	6.49		32%	35%
90	35%	6.5	32%	6.48	6.5	34%	32%
	34%	6.3	33%	6.47		35%	33%
	34%	6.35	34%	6.49		36%	34%
	36%	6.41	35%	6.47		32%	37%
	33%	6.38	32%	6.46		34%	33%
120	34%	6.3	34%	6.46		33%	34%
	33%	6.29	34%	6.45		35%	33%
	35%	6.31	35%	6.46		33%	35%
	34%	6.28	36%	6.4		34%	32%
	33%	6.31	32%	6.39		34%	33%

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La velocidad de reacción biológica del líquido ruminal vacuno en la degradación del tereftalato de polietileno en 120 días es de 4.17×10^{-1} g/Kg/día en promedio, y para el poliestireno es de 1.42×10^{-1} g/Kg/día en promedio.
- La velocidad de reacción del *Tenebrio molitor* en la degradación del tereftalato de polietileno en 120 días es de 3.9185×10^{-2} g/Kg/día en promedio, y para el poliestireno es de 2.5620 g/Kg/día en promedio.
- El porcentaje de reducción de los pesos del tereftalato de polietileno y poliestireno en función al líquido ruminal vacuno y *Tenebrio molitor* en tiempos de 30, 60, 90 y 120 días es de: líquido ruminal vacuno PET, 1.145%, 2.447%, 3.589%, y 5.767%, respectivamente; líquido ruminal vacuno EPS, 0.39%, 0.89%, 1.16%, y 1.90%. *Tenebrio molitor* PET, 0.105%, 0.187%, 0.340%, y 0.632% respectivamente; *Tenebrio molitor* EPS, 5.71%, 15.25%, 23.57%, y 38.20% respectivamente.

5.2. Recomendaciones

- Realizar un seguimiento exhaustivo del recuento de larvas de *Tenebrio molitor* para evaluar la mortalidad de las mismas a lo largo de diferentes intervalos de tiempo.
- Triturar los polímeros sintéticos para crear partículas diminutas, ya que esto facilitará la adhesión de los microorganismos y, en consecuencia, mejorará su adaptación y capacidad de degradación.
- Realizar un análisis de ADN del *Tenebrio molitor* para identificar genes asociados específicamente con la degradación de polímeros.
- Aislar e identificar la microbiota presente en el líquido ruminal vacuno.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

- Acuña Molina, N. R. (2017). *Revisión bibliográfica sobre los microorganismos biodegradadores de polietileno de baja densidad y sus efectos en el material*. [Tesis de Pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio institucional.
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5608/Acu%F1aMolinaNelsonRicardo2017.pdf;jsessionid=4B7A47FFA74E9276F090328136936221?sequence=1>
- Ahmed, T., Shahid, M., Azeem, F., Rasul, I., Shah, A. A., Nadie, M., . . . Muhammad, S. (2018). Biodegradación de plásticos: escenario actual y perspectivas de futuro para la seguridad ambiental. *Environ Sci Pollut Res*, 25, 7287–7298.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
- Alarcón, T., D’Auria, G., Delgado, S., Campo, R., y Ferrer, M. (2016). *Procedimientos en Microbiología Clínica*. Sociedad Española de Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica (SEIMC).

<https://seimc.org/contenidos/documentoscientificos/procedimientosmicrobiologia/seimc-procedimientomicrobiologia59mod.pdf>

Alexander, M. (1999). *Biodegradación y Biorremediación*. Editorial Academic Press. Nueva York.

Álvarez, D., y Botache, L. (2020). *Biodegradación de plástico con larvas del coleóptero tenebrio molitor como un aporte interdisciplinar a la biotecnología ambiental*. [tesis de grado, Universidad Pedagógica Nacional]. Repositorio institucional.

http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/12205/Biodegradacion_de_Plastico_con_Larvas_Tm%20%282%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., y Pillai, S. (2021). Biodegradación del plástico: microbios de primera línea y sus enzimas. *Ciencia del medio ambiente total*, 759.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>

Arciniega Carreón, I. Y. (2008). *Aislamiento de microorganismos degradadores de tereftalato de polietileno (PET) en medio ambiente combinado*. [tesis de pregrado, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio institucional.

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14439/ProyectoFinal.pdf?sequence=1>

Ariba, M., Varalakshmi, B., y Umamageswari, K. (2015). Biodegradation of Polythene Bag using Bacteria Isolated from Soil. *International Journal of current microbiology and applied sciences*, 4(11), 674-680. [https://www.ijcmas.com/vol-4-](https://www.ijcmas.com/vol-4-11/M.%20Ariba%20Begum,%20et%20al.pdf)

[11/M.%20Ariba%20Begum,%20et%20al.pdf](https://www.ijcmas.com/vol-4-11/M.%20Ariba%20Begum,%20et%20al.pdf)

Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Shrinivas Arkatkar, A., Doble, M., Bhaduri, S., y Veera Uppara, P. (2008). Biodegradación del polietileno y polipropileno. *Revista India de Biotecnología*,

7(1), 9-22.

https://www.researchgate.net/publication/228090462_Biodegradation_of_polyethylene_and_polypropylene

Baba, Z. A., Aziz, M. A., Sheikh, T. A., Sheikh, F. A., Bhat, Z. A., y Hamid, B. (2015). Studies on soil health and plant growth promoting potential of Rhizobium isolates. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 27(5), 423.

Barbarán Silva, H. M., Cabanillas Paredes, L. J., y Rubio Rodriguez, Y. E. (2018).

Biodegradación de polietileno tereftalato (PET) por acción de Pseudomona aeruginosa, en condiciones de laboratorio. Trujillo, Perú: [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional.

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32118>

Bermúdez Morera, D. C. (2021). *Evaluación de microorganismos (Trichoderma spp. y*

Pseudomona aeruginosa) para la degradación del PET. Bogotá, Colombia: [tesis de pregrado, Universidad de América]. Repositorio institucional.

<https://hdl.handle.net/20.500.11839/8315>

Bonilla, D., Noboa, L., Portuguez, V., Quinto, F., & Rojas, J. (2020). Metanogénesis microbiana en animales poligástricos. *Nutrición Animal Tropical*, 14(1), 36-49.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8113238>

Butrón Pinazo, S. B. (2020). *Capacidad de Biodegradación De Pseudomona aeruginosa frente al polietileno de baja densidad*. Puno, Perú: [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional. <https://es.scribd.com/document/510286909/05->

CAPACIDAD-de-BIODEGRADACION-de-*Pseudomonas-Aeruginosa*-FRENTE-Al-Polietileno-de-Baja-Densidad

Camacho, R., y Hoyos, J. (2014). Biodegradación anaeróbica de un material biodegradable bajo digestión anaerobia termófila. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 12(2), 10. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v12n2/v12n2a03.pdf>

Campos Granados, M. (2021). *Biodegradación de plásticos convencionales: Estrategias y perspectivas*. [tesis de grado, Universidad de Almería]. Repositorio institucional. <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/13496/CAMPOS%20GRANADOS,%20MIGUEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ccallo, M., Sacaca, F., Callata, R. A., Vigo, J. E., y Calla, J. (2020). Biodegradación de polímeros de plástico por *Pseudomonas*. *Revista de investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 6(2), 46-59. https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/article/view/1457

Chunga Campos, L. D., & Cieza Martínez, C. A. (2016). *Biodegradación de poliestireno utilizando microorganismos presentes en el humus de lombriz durante los meses, Octubre-Diciembre 2016*. Perú: (Tesis de pregrado, Universidad de Lambayeque). Repositorio institucional. https://repositorio.udl.edu.pe/bitstream/UDL/83/3/TESIS_BIODEGRADACION.pdf

Corredor Bejar, S. (2022). *Diseño del proceso productivo y construcción de nave de procesado para 45.351 Kg/año de insectos comestibles en Jalcomulco, Veracruz (México)*. [Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio institucional. https://oa.upm.es/72050/1/TFG_SERGIO_CORREDOR_BEJAR.pdf

- Damayanti, N., Sulaimán, N., y Ibrahim, N. (2020). Biodegradación plástica por *Pseudomonas aeruginosa* UKMCC1011 utilizando una columna Winogradsky modificada. *Persatuan Pelajar Indonesia*, 7(2). <https://www.kemalapublisher.com/index.php/ppi-ukm/article/view/458>
- Danso, D., Chow, J., y Streit, W. R. (2019). Plásticos: perspectivas ambientales y biotecnológicas sobre la degradación microbiana. *Microbiología Aplicada y Ambiental*, 85(19). <https://doi.org/https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19>
- Daviran Yance, P. A. (2017). *Biodegradación de la espuma de poliestireno por la larva del Tenebrio molitor para la producción de abono, 2017*. Lima, Perú: [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/22578/Daviran_YP.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Díaz Gámez, G. M. (2014). *Uso de la larva de Tenebrio (Tenebrio molitor) como aditivo proteico, en la alimentación de codornices (Coturnix coturnix japonica)*. [tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.
- Dolores, M., de Evan, T., y González, J. (2018). Emisiones de metano en los animales rumiantes: influencia de la dieta. *Nutrición*, 32-35. https://oa.upm.es/54818/1/INVE_MEM_2018_296591.pdf
- Elsheikh, E. A. (2015). Response of legume-Rhizobium symbiosis to salinity in the Sudan: a review. *Journal of Agricultural Science*, 6(2), 142-156.
- Espinola, N., y Sturzenegger, G. (2024). *¡Celebramos el Día Mundial del Reciclaje 2024! Los recicladores son parte integral en la lucha contra la contaminación plástica*. BID:

<https://blogs.iadb.org/agua/es/celebramos-el-dia-mundial-del-reciclaje-2024-los-recicladores-son-parte-integral-en-la-lucha-contra-la-contaminacion-plastica/#:~:text=De%20estos%2C%20apenas%20un%209,contaminando%20ecosistemas%20terrestres%20y%20acu%C3%A1ti>

Estrada Flores, J. D. (2011). *Alternativas de biodegradabilidad del polietilentereftalato (PET)*.

[Tesis de postgrado, Centro de Investigación en Química Aplicada]. Repositorio institucional.

<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/387/1/Jesus%20Daniel%20Estrada%20Flores.pdf>

Fernández, R. (2024). *Distribución porcentual de los residuos plásticos a nivel mundial entre 2020 y 2060, según su destino final*. Statista:

<https://es.statista.com/estadisticas/1484226/distribucion-de-los-residuos-plasticos-a-nivel-mundial-segun-destino-final/>

Gajendiran, A., Krishnamoorthy, S., y Abraham, J. (2016). Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Aspergillus clavatus* strain JASK1 isolated from landfill soil. *Biotech*, 6(52), 6. <https://doi.org/https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-016-0394-x>

García Sánchez, M. (2017). *Ingeniería básica de una planta de producción de Polietileno Tereftalato*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Sevilla]. Repositorio institucional.

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91113/fichero/TFGdefinitivo.pdf>

García, S. (2009). Referencias históricas y evolución de los plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 10(1), 71- 80. <https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/07/2009-garcia.pdf>

- Gesamp. (2015). Microplastics in the ocean: global assessment. *United Nations Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution (GESAMP), Working Group 40*, 8. http://www.gesamp.org/site/assets/files/1720/24472_gesamp_leaflet_pq.pdf
- Geyer, R., Jambeck, J., y Law, K. (2017). Plastics production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gravouil, K., Ferru, R., Colas, E., Helye, R., kadri, L., Burdeos, L., . . . Ferreira, T. (2017). La transcriptómica y la lipidómica de la cepa ambiental *Rhodococcus ruber* señalan las vías de consumo y los posibles obstáculos metabólicos para la degradación del polietileno. *Medio Ambiente. Ciencia. Tecnología*, 51(9), 5172–5181. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b00846>
- Gutiérrez Alvarez, A. I. (2019). *Biodegradación de polietileno de baja densidad utilizando hongos, bacterias y consorcios microbianos aislados del botadero municipal de Tacna*. [Tesis de Pregrado, Universidad Privada de Tacna, Perú]. Repositorio institucional. <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/1269/Gutierrez-Alvarez-Ana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Heldman, D. R. (2011). Diseño de procesos de conservación de alimentos. *Procedia Food Science*, 1, 685 – 689. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211601X11001040>
- Hernández, S. A., Martínez, J., y Pérez, L. B. (2015). Bacterias hidrocarbonoclasticas biodegradantes de poliestireno expandido. *Foresta Veracruzana*, 17(2), 21-28. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49743956003.pdf>

- Jung, J., Heo, A., Park, Y., Kim, Y., Koh, H., y Park, W. (2014). Gut microbiota of *Tenebrio molitor* and their response to environmental change. *J. Microbiol. Biotechnol*, 888-897.
- Limón Gonzáles, M. (2001). *Biodegradación de polietileno de baja densidad por hongos filamentosos*. Iztapalapa, México: [Tesis de postgrado, Universidad Autónoma Metropolitana.México]. Repositorio institucional.
<http://tesiuami.izt.uam.mx/uam/aspuam/presentatesis.php?recno=4248&docs=UAM4248>.
PDF
- López Carrasquero, F. (2004). *Fundamentos de Polímeros (Vol. 1)*.
https://es.slideshare.net/vicant94/polimeros-pdf?from_action=save
- López Paredes, M. K. (2020). *Supervivencia de larvas de dos especies de escarabajos *Tenebrio molitor* y *Dermestes sp.* expuestas a dietas basadas en dos tipos de plásticos (polietileno y poliestireno)*. Quito, Ecuador: [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador].
Repositorio institucional. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/21338/1/T-UCE-0016-CBI-055.pdf>
- Lozano Díaz, J. (2023). *Eficiencia del aire disuelto y/o polielectrolito catiónico, en la separación de aceites y grasas del efluente de la industria láctea, Celendín - 2022*. [tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio institucional.
<https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/5549>
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H., y Stahl, D. A. (2015). *Brock. Biología de los microorganismos*. PEARSON.
https://www.academia.edu/39077515/Biolog%C3%ADa_de_los_microorganismos_BROCK

- Martínez, C., y Canepa, J. R. (2001). Poliestireno Expandido (EPS) y su Problemática Ambiental. *Revista de Divulgación de la División Académica de Ciencias Biológicas*, 59-66.
- Medrano Vega, L. C. (2019). *Larvas de gusano de harina (Tenebrio molitor) como alternativa proteica en la alimentación animal*. [tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD].
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/28001/lcmedranov.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Meza, S. S., y Pérez, B. Y. (2015). *Caracterización de la cadena de abastecimiento de botellas de tereftalato de polietileno como estrategia de optimización del reciclaje en la ciudad de Barranquilla*. [tesis de pregrado, Universidad de la Costa, p.16]. Repositorio institucional.
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/4822/CARACTERIZACION%20DE%20LA%20CADENA%20DE%20ABASTECIMIENTO%20DE%20BOTELLAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mier, J., Artiaga, R., y García, L. (1997). Síntesis de Polímeros. Pesos moleculares. Conformación y configuración. 11-48.
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9638/CC_32_art_1.pdf
- Millán, M. F., y Jiménez, D. (2023). *Degradación y reciclaje biológico del PET*. Repositorio Institucional Séneca.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/c4478565-8c75-4428-bff3-11dd24f7a54b/content>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2024). *Instructivo Menos Plástico Más Vida 2024*.

<https://www.gob.pe/institucion/minam/campa%3B1as/26-menos-plastico-mas-vida>

Miron, J., Ben-Ghedalia, D., y Morrison, M. (2001). Invited Review: Adhesion Mechanisms of Rumen Cellulolytic Bacteria. *Journal of Dairy Science*, 84(6), 1294–1309.

[https://pdf.sciencedirectassets.com/279785/1-s2.0-S0022030201X70070/1-s2.0-S0022030201701592/main.pdf?X-Amz-Security-](https://pdf.sciencedirectassets.com/279785/1-s2.0-S0022030201X70070/1-s2.0-S0022030201701592/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEiX%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQCG34XqeiJf%2BjuxviFOsAh3bK1hQLFcSw0w3SkIQmWH2wIgN57%2BA7y1)

[Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEiX%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVz](https://pdf.sciencedirectassets.com/279785/1-s2.0-S0022030201X70070/1-s2.0-S0022030201701592/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEiX%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQCG34XqeiJf%2BjuxviFOsAh3bK1hQLFcSw0w3SkIQmWH2wIgN57%2BA7y1)

[LWVhc3QtMSJHMEUCIQCG34XqeiJf%2BjuxviFOsAh3bK1hQLFcSw0w3SkIQmWH2wIgN57%2BA7y1](https://pdf.sciencedirectassets.com/279785/1-s2.0-S0022030201X70070/1-s2.0-S0022030201701592/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEiX%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQCG34XqeiJf%2BjuxviFOsAh3bK1hQLFcSw0w3SkIQmWH2wIgN57%2BA7y1)

Molina, F., Flores, K., y Hermosillo, M. (2016). *Degradación de Polímeros con Tenebrio Molitor*. Congreso de ciencias. <https://dspace.umad.edu.mx/handle/11670/261>

Montoya, C., Álvarez, M., y Ruíz, G. (2010). Degradación de mezclas de almidón termoplástico (TPS)/polihidroxibutirato (PHB)/y almidón termoplástico (TPS)/polietileno de baja densidad(LDPE). *IBEROMET XI XCONAMET/SAM*, 10.

https://www.academia.edu/23063903/DEGRADACION%20DE_MEZCLAS_ALMIDON%20TERMOPLASTICO_TPS_POLIHIDROXIBUTIRATO_PHB_Y_ALMIDON%20TERMOPLASTICO_TPS_POLIETILENO_DE_BAJA_DENSIDAD_LDPE

Nauendorf, A., Krause, S., Bigalke, N., Gorb, E., Gorb, S., Haeckel, M., . . . Treude, T. (2016). Colonización microbiana y degradación de bolsas de polietileno y plástico biodegradable en sedimentos marinos templados de grano fino y ricos en materia orgánica. *Boletín de*

contaminación marina, 103(1 y 2), 168-178.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X15302277>

Ocles Gudiño, E. M. (2017). *Las industrias del sector poliestireno en el marco del código orgánico de la producción*. Ecuador: [Tesis de postgrado, Universidad Andina Simón Bolívar, Ecuador]. Repositorio institucional.

<https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/6032>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (Noviembre de 2017). *Programa para el medio ambiente*. [unep.org/es/noticias-y-reportajes](https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes): <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-sistema-de-deposito-y-retorno-de-botellas-un-aliado-en-la-lucha>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2018). Plásticos de un solo uso: Una hoja de ruta para la sostenibilidad. *ONU Medio Ambiente, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*, 6, 104.

https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:9e2ee8T4r7gJ:https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25496/singleUsePlastic_SP.pdf%3FisAllowed%3Dy%26sequence%3D2&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=pe

Oyarce, I. Y. (2017). *Exportación de tereftalato de polietileno reciclado como estrategia para el desarrollo sostenible [Tesis de Pregrado, Universidad Norbert Wiener]*. Repositorio institucional de la Universidad Norbert Wiener, p67, Arequipa, Perú, Arequipa.

Peng, G., Pageau, D., Strelkov, S. E., Lahlali, R., Hwang, S. F., Hynes, R. K., y Falk, C. K.

(2013). Assessment of crop rotation, cultivar resistance and *Bacillus subtilis* biofungicide for control of clubroot on canola. *Acta Hort*, 591-598.

- Pérez, M. S., y Pineda, Á. J. (2020). *Tenebrio molitor* (Linnaeus, 1758) (Coleoptera: *Tenebrionidae*): notas sobre su importancia e identificación taxonómica. *Boletín del Museo Entomológico Francisco Luis Gallego*, 12(2), 17-25.
<https://ciencias.medellin.unal.edu.co/museos/entomologico/images/Boletin/2020-06/Boletn.pdf>
- Portocarrero Estrada, F. R. (2021). *Biodegradación de poliestireno con Tenebrio Molitor para la sostenibilidad de empresas*. Lima, Perú: [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Repositorio institucional.
<https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20.500.12866/9025>
- Poveda, J. (2017). Mealfress III: Utilización de excrementos del gusano de la harina (*Tenebrio molitor*) como abono orgánico con capacidad biopesticida. XXXIII Encuentro de Jóvenes Investigadores. *Instituto de Investigaciones Científicas y Ecológicas*.
- Ramírez, J., y Ayala, M. (2014). Enzimas: ¿Qué son y cómo funcionan? *Revista digital universitaria*, 15(12), 1-13. <https://www.revista.unam.mx/vol.15/num12/art91/art91.pdf>
- Rasaei, B., Ghobadi, M. E., Ghobadi, M., y Najaphy, A. (2013). Reducing effects of drought stress by application of humic acid, mycorrhiza and Rhizobium on chickpea. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(16), 1775.
- Restrepo, J. M., Bassi, A., y Thompson, M. R. (2014). Degradación microbiana y deterioro del polietileno – Una revisión. *Biodeterioro y Biodegradación Internacional*, 88, 83-90.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096483051300454X>

- Rotger Cerdá, A. (2004). *Fermentación ruminal, degradación proteica y sincronización energía-proteína en terneras en cebo intensivo*. [tesis de postgrado, Universidad Autónoma de Barcelona]. <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5667/arc1de1.pdf>
- Thieman , W. J., y Palladino, M. A. (2010). *Introducción a la Biotecnología* (2 edición ed.). (M.-Romo, Ed.) Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN S.A.
https://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/copia_de_thiebiot.pdf
- Torres García, F. (1999). Polímeros: Procesos de manufactura y diseño parte 1: Termoplásticos. *Revista de química, XIII*(1), 56-68.
- Torres García, F. (1999). Polímeros: procesos de manufactura y diseño. Parte 1: termoplásticos. *Revista De Química, 13*(1), 55-67.
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/4702>
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W.-M., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., . . . Jiang, L. (2015). Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms. Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. *Environmental Science and Technology, 1*, 1-7.
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5b02661>
- Zhang, A. M., Zhao, G. Y., Gao, T. G., Wang, W., Li, J., Zhang, S. F., y Zhu, B. C. (2013). Solubilization of insoluble potassium and phosphate by *Paenibacillus kribensis* CX-7: A soil microorganism with biological control potential. *African Journal of Microbiology Research, 7*(1), 41-47.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

ANEXO I. Cálculo de la velocidad de reacción biológica del líquido ruminal en la degradación de PET y EPS

$$\text{Velocidad de degradación} = \frac{\text{masa inicial (g)} - \text{masa final (g)}}{\text{masa inicial (Kg)} \times \text{tiempo}}$$

Polímeros plásticos	Tiempo (DIA)	Peso Inicial PI (g)	Peso Final PI (g)	PI-PF	Promedio inicial	Promedio final	Velocidad de reacción		
Tereftalato de polietileno (PET)	30	0.211	0.2085	0.0024	0.2109	0.2085	0.3817127		
		0.2109	0.2085	0.0024					
		0.2120	0.2096	0.0024					
		0.2096	0.2072	0.0024					
		0.2109	0.2085	0.0024					
		0.2051	0.2000	0.0050					
	60	0.2040	0.1990	0.0050	0.2050	0.2000	0.4078166		
		0.2060	0.2010	0.0050					
		0.2050	0.2000	0.0050					
		0.2050	0.2000	0.0050					
		0.2159	0.2081	0.0077					
		0.2160	0.2083	0.0077					
	90	0.2159	0.2082	0.0077	0.2159	0.2082	0.3987303		
		0.2149	0.2072	0.0077					
		0.2169	0.2092	0.0077					
		0.211	0.1987	0.0122					
		0.2112	0.1989	0.0122					
		0.212	0.1997	0.0122					
120	0.2121	0.1998	0.0122	0.2117	0.1995	0.4805519			
	0.2125	0.2002	0.0122						
	0.0638	0.0635	0.0002				0.0638	0.0636	0.1303101
	0.0637	0.0634	0.0002						
	0.0639	0.0636	0.0002						
	0.0639	0.0637	0.0002						
0.0639	0.0636	0.0002							
0.0659	0.0653	0.0005							
Poliestireno (EPS)	60	0.0661	0.0655	0.0005	0.0665	0.0659	0.1489276		
		0.0662	0.0656	0.0005					
		0.0663	0.0657	0.0005					
		0.0681	0.0675	0.0005					
		0.085	0.0840	0.0009					
		0.0858	0.0848	0.0009					
90	0.0854	0.0844	0.0009	0.0854	0.0844	0.1290138			
	0.0854	0.0844	0.0009						

		0.0804	0.0794	0.0009			
		0.0904	0.0894	0.0009			
		0.0761	0.0746	0.0014			
		0.0769	0.0754	0.0014			
	120	0.0765	0.0751	0.0014	0.0765	0.0750	0.1580828
		0.0764	0.0749	0.0014			
		0.0765	0.0750	0.0014			

ANEXO II. Cálculo de la velocidad de reacción biológica del *Tenebrio molitor* en la degradación de PET y EPS

$$\text{Velocidad de degradación} = \frac{\text{masa inicial (g)} - \text{masa final (g)}}{\text{masa inicial (Kg)} \times \text{tiempo}}$$

Polímeros plásticos	Tiempo (Día)	Peso Inicial PI (g)	Peso Final PI (g)	PI-PF	Promedio inicial	Promedio final	Velocidad de reacción
Tereftalato de polietileno (PET)	30	0.1933	0.1931	0.0002	0.1933	0.1930962	0.0351440
		0.1934	0.1931	0.00021			
		0.1932	0.193	0.0002			
		0.1934	0.1931	0.0002			
		0.1932	0.1930	0.000199			
	60	0.2255	0.2250	0.00042	0.22558	0.2251586	0.0311346
		0.2258	0.2253	0.000415			
		0.2253	0.2248	0.00043			
		0.2258	0.2253	0.000423			
		0.2255	0.2250	0.000419			
	90	0.2339	0.2331	0.000789	0.234126	0.233329	0.0378239
		0.2286	0.2278	0.000796			
		0.2438	0.2429	0.000801			
		0.2289	0.2281	0.00081			
		0.2354	0.2346	0.000789			
	120	0.2002	0.1989	0.00128	0.204264	0.2029738	0.0526361
		0.2001	0.1987	0.00131			
		0.2075	0.2062	0.00129			
0.194		0.1927	0.00128				
0.2195		0.2182	0.001291				
Poliestireno (EPS)	30	0.091	0.0858	0.0052	0.0912	0.0859906	1.9040205
		0.0914	0.0861	0.00521			
		0.0908	0.0855	0.005214			
		0.0902	0.0849	0.005211			

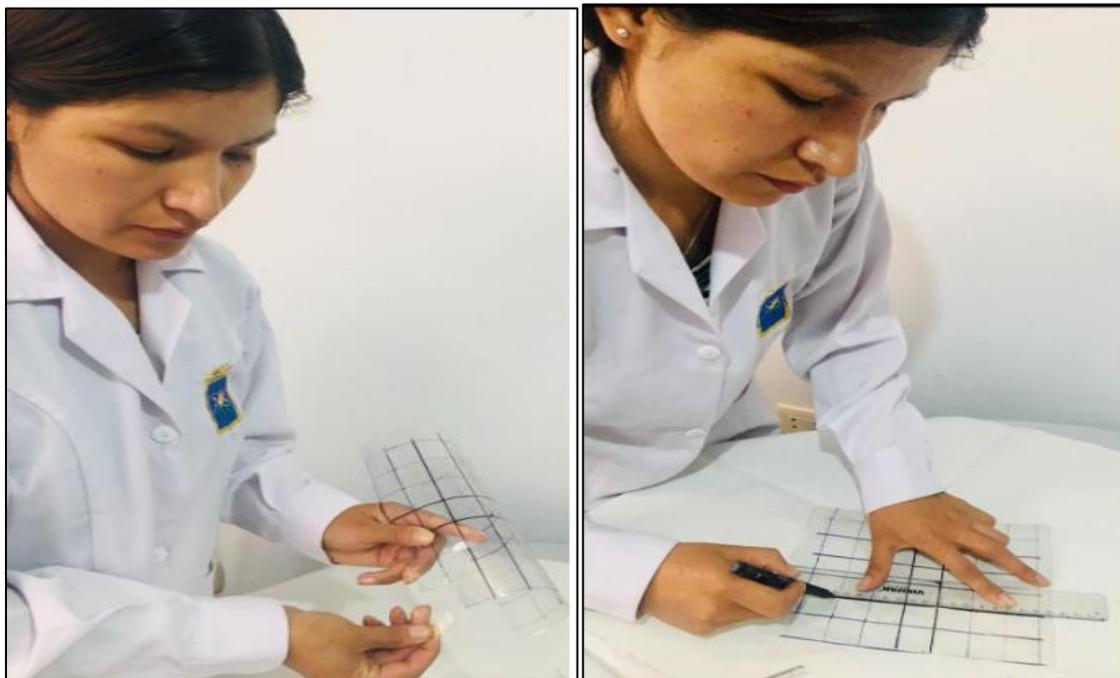
	0.0926	0.0873	0.005212			
	0.0802	0.0679	0.01229			
	0.0797	0.0675	0.012199			
60	0.081	0.0685	0.01241	0.08072	0.0684122	2.5412537
	0.0812	0.0688	0.01235			
	0.0815	0.0692	0.01229			
	0.09	0.0686	0.02135			
	0.091	0.0696	0.02132			
90	0.0895	0.0681	0.021333	0.0905	0.0691668	2.6191774
	0.0915	0.0701	0.021342			
	0.0905	0.0691	0.021321			
	0.0899	0.0553	0.03457			
	0.0901	0.0555	0.03458			
120	0.091	0.0564	0.03456	0.0905	0.055926	3.1836096
	0.0908	0.0562	0.03457			
	0.0907	0.0561	0.03459			

ANEXO III Porcentaje de remoción del peso del PET y EPS

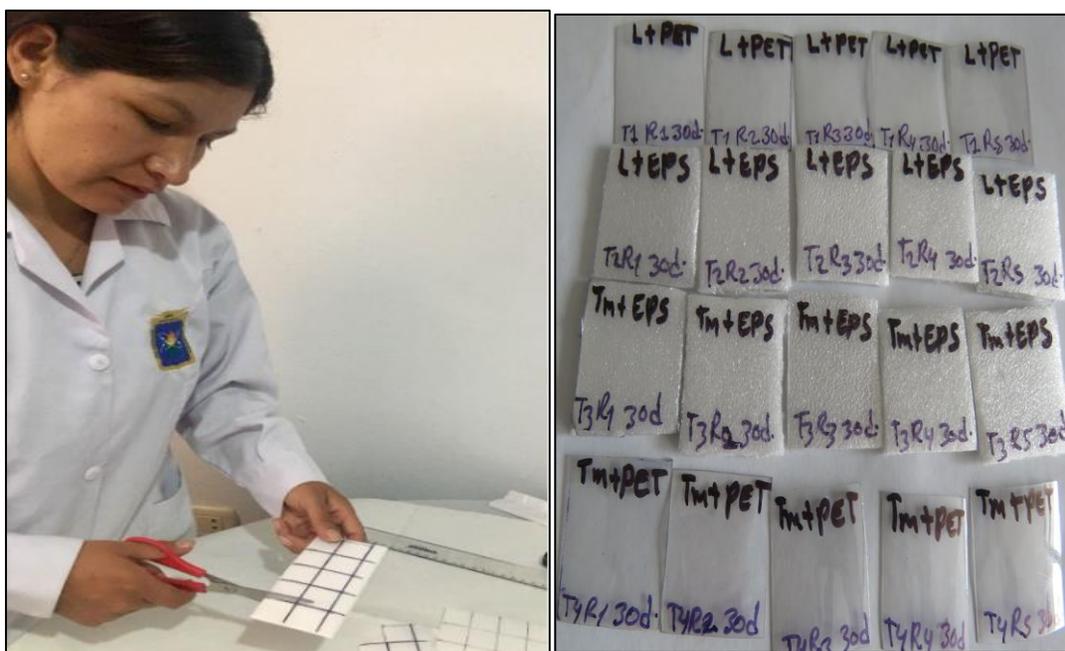
Polímeros plásticos	PET			EPS		
	Promedio del PI	Promedio del PF	% Remoción	Promedio del PI	Promedio del PF	% Remoción
Líquido ruminal vacuno	0.2109	0.2085	1.145%	0.0638	0.0636	0.39%
	0.2050	0.2000	2.447%	0.0665	0.0659	0.89%
	0.2159	0.2082	3.589%	0.0854	0.0844	1.16%
	0.2117	0.1995	5.767%	0.0765	0.0750	1.90%
Tenebrio molitor	0.1933	0.1930	0.105%	0.0912	0.0859	5.71%
	0.2255	0.2251	0.187%	0.0807	0.0684	15.25%
	0.2341	0.2333	0.340%	0.0905	0.0691	23.57%
	0.2042	0.2029	0.632%	0.0905	0.0559	38.20%

ANEXO IV. Panel fotográfico

Recorte del tereftalato de polietileno



Recorte y rotulación del poliestireno



Extracción y preparación del líquido ruminal



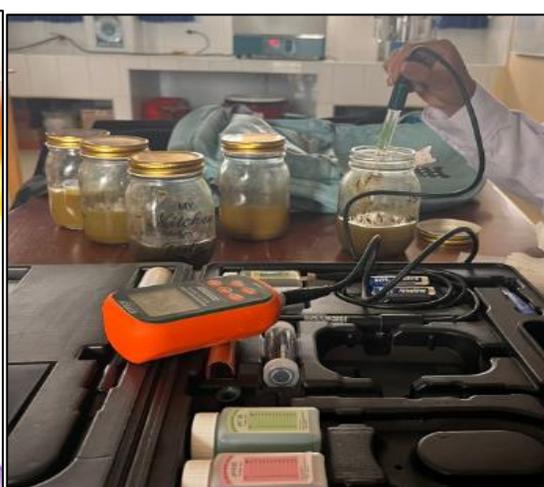
Trabajo de laboratorio



Montaje de los tratamientos



Evaluación de los tratamientos



ANEXO V. Informes de laboratorio de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA 			
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS			
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL			
<u>SEDE CELENDÍN</u>			
LABORATORIO DE BIOLOGÍA Y QUÍMICA			
Shuitute s/n – Chacapampa – Celendín - Teléfono 076- 555307 – E-mail: eapiac-unc@hotmail.com			
INFORME DE ENSAYO N° 01			
DATOS DEL TESISTA			
1. Nombre y apellidos: Noemi Elizabeth Leyva López 2. Dirección: Jr. pedro Ortiz Montoya 1745 3. Correo electrónico: nieyval15_2@unc.edu.pe			
DATOS DE LA MUESTRA			
1. Fecha: 05/06/2023 2. Hora: 2: 00 pm 3. Tiempo: 30 días			
4. Número de muestras: 04 5. Tipo de muestra: Sólida y líquida 6. Ensayos a realizar: incubación			
DATOS DE CONTROL			
Fecha inicial: 05/06/2023	Fecha final: 05/07/2023	Hora: 5:00 Pm	
Muestra 01: Polietileno PET + líquido ruminal vacuno		Muestra 03: Tereftalato de polietileno (PET) + <i>Tenebrio molitor</i>	
Peso inicial PI (g)	Peso final PF (g)	Peso inicial PI (g)	Peso final PF (g)
T1R1:0, 21100	T1R1:0, 208590	T1R1:0, 1933	T1R1:0, 19310
T1R2:0, 21099	T1R2:0, 208575	T1R2:0, 1934	T1R2:0, 19319
T1R3:0, 21205	T1R3:0, 209663	T1R3:0, 1932	T1R3:0, 19300
T1R4:0, 20969	T1R4:0, 207278	T1R4:0, 1934	T1R4:0, 19319
T1R5:0, 21099	T1R5:0, 208569	T1R5:0, 1932	T1R5:0, 193001
Muestra 02: Poliestireno (EPS) + líquido ruminal vacuno		Muestra 04: Poliestireno (EPS) + <i>Tenebrio molitor</i>	
T1R1:0, 06380	T1R1:0, 0635488	T1R1:0, 0910	T1R1:0, 085800
T1R2:0, 06370	T1R2:0, 0634501	T1R2:0, 0914	T1R2:0, 086190
T1R3:0, 06392	T1R3:0, 0636186	T1R3:0, 0908	T1R3:0, 085586
T1R4:0, 06395	T1R4:0, 063701	T1R4:0, 0902	T1R4:0, 084989
T1R5:0, 06393	T1R5:0, 063680	T1R5:0, 0926	T1R5:0, 087388






UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS



ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

SEDE CELENDÍN

LABORATORIO DE BIOLOGÍA Y QUÍMICA

Shuitute s/n – Chacapampa – Celendín - Teléfono 076- 555307 – E-mail: eapiac-unc@hotmail.com

INFORME DE ENSAYO N° 02

DATOS DEL TESISTA

4. Nombre y apellidos: Noemi Elizabeth Leyva López
5. Dirección: Jr. pedro Ortiz Montoya 1745
6. Correo electrónico: nleyval15_2@unc.edu.pe

DATOS DE LA MUESTRA

7. Fecha: 05/06/2023
8. Hora: 2: 00 pm
9. Tiempo: 60 días
10. Número de muestras: 04
11. Tipo de muestra: Sólida y líquida
12. Ensayos a realizar: incubación

DATOS DE CONTROL

Fecha inicial: 05/06/2023		Fecha final: 04/08/2023		Hora: 7:00 Am	
Muestra 01: Polietileno PET + liquido ruminal vacuno			Muestra 03: Tereftalato de polietileno (PET) + <i>Tenebrio molitor</i>		
Peso inicial PI (g)	Peso final PF (g)	Peso inicial PI (g)	Peso final PF (g)		
T2R1:0, 2051	T2R1:0, 200084	T2R1:0, 2255	T2R1:0, 22508		
T2R2:0, 20409	T2R2:0, 199069	T2R2:0, 2258	T2R2:0, 225385		
T2R3:0, 20608	T2R3:0, 201061	T2R3:0, 2253	T2R3:0, 22487		
T2R4:0, 20506	T2R4:0, 200042	T2R4:0, 2258	T2R4:0, 225377		
T2R5:0, 20509	T2R5:0, 200073	T2R5:0, 2255	T2R5:0, 225081		
Muestra 02: Poliestireno (EPS) + liquido ruminal vacuno			Muestra 04: Poliestireno (EPS) + <i>Tenebrio molitor</i>		
T2R1:0, 0659	T2R1:0, 065309	T2R1:0, 0802	T2R1:0, 06791		
T2R2:0, 0661	T2R2:0, 065505	T2R2:0, 0797	T2R2:0, 067501		
T2R3:0, 0662	T2R3:0, 065608	T2R3:0, 081	T2R3:0, 06859		
T2R4:0, 0663	T2R4:0, 065701	T2R4:0, 0812	T2R4:0, 06885		
T2R5:0, 0681	T2R5:0, 067505	T2R5:0, 0815	T2R5:0, 06921		






UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

SEDE CELENDÍN

LABORATORIO DE BIOLOGÍA Y QUÍMICA

Shuitute s/n – Chacacampa – Celendín - Teléfono 076- 555307 – E-mail: eapiac-unc@hotmail.com

INFORME DE ENSAYO N° 03

DATOS DEL TESISISTA

7. Nombre y apellidos: Noemi Elizabeth Leyva López
 8. Dirección: Jr. pedro Ortiz Montoya 1745
 9. Correo electrónico: nleyval15_2@unc.edu.pe

DATOS DE LA MUESTRA

13. Fecha: 05/06/2023
 14. Hora: 2: 00 pm
 15. Tiempo: 90 días
 16. Número de muestras: 04
 17. Tipo de muestra: Sólida y líquida
 18. Ensayos a realizar: incubación

DATOS DE CONTROL

Fecha inicial: 05/06/2023		Fecha final: 06/09/2023		Hora: 10:00 Am	
Muestra 01: Polietileno PET + líquido ruminal vacuno			Muestra 03: Tereftalato de polietileno (PET) + <i>Tenebrio molitor</i>		
Peso inicial PI (g)	Peso final PF (g)	Peso inicial PI (g)	Peso final PF (g)		
T3R1:0, 21591	T3R1:0, 208159	T3R1:0, 2339	T3R1:0, 233111		
T3R2:0, 21605	T3R2:0, 208301	T3R2:0, 2286	T3R2:0, 227804		
T3R3:0, 21598	T3R3:0, 20823	T3R3:0, 2438	T3R3:0, 242999		
T3R4:0, 21498	T3R4:0, 207228	T3R4:0, 22893	T3R4:0, 22812		
T3R5:0, 21698	T3R5:0, 209229	T3R5:0, 2354	T3R5:0, 234611		
Muestra 02: Poliestireno (EPS) + líquido ruminal vacuno			Muestra 04: Poliestireno (EPS) + <i>Tenebrio molitor</i>		
T3R1:0, 085	T3R1:0, 084008	T3R1:0, 09	T3R1:0, 06865		
T3R2:0, 0858	T3R2:0, 084806	T3R2:0, 091	T3R2:0, 06968		
T3R3:0, 0854	T3R3:0, 084409	T3R3:0, 0895	T3R3:0, 068167		
T3R4:0, 0804	T3R4:0, 079411	T3R4:0, 0915	T3R4:0, 070158		
T3R5:0, 0904	T3R5:0, 089408	T3R5:0, 0905	T3R5:0, 069179		





UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL

SEDE CELENDÍN

LABORATORIO DE BIOLOGÍA Y QUÍMICA

Shuitute s/n – Chacacampa – Celendín - Teléfono 076- 555307 – E-mail: eapiac-unc@hotmail.com

INFORME DE ENSAYO N° 04

DATOS DEL TESISISTA

10. Nombre y apellidos: Noemi Elizabeth Leyva López
 11. Dirección: Jr. pedro Ortiz Montoya 1745
 12. Correo electrónico: nleyval15_2@unc.edu.pe

DATOS DE LA MUESTRA

19. Fecha: 05/06/2023
 20. Hora: 2: 00 pm
 21. Tiempo: 120 días
 22. Número de muestras: 04
 23. Tipo de muestra: Sólida y líquida
 24. Ensayos a realizar: incubación

DATOS DE CONTROL

Fecha inicial: 05/06/2023		Fecha final: 06/10/2023		Hora: 8:00 Am	
Muestra 01: Polietileno PET + líquido ruminal vacuno			Muestra 03: Tereftalato de polietileno (PET) + <i>Tenebrio molitor</i>		
Peso inicial PI (g)	Peso final PF (g)	Peso inicial PI (g)	Peso final PF (g)		
T4R1:0, 21100	T4R1:0, 198785	T4R1:0, 2002	T4R1:0, 19892		
T4R2:0, 2112	T4R2:0, 198988	T4R2:0, 2001	T4R2:0, 19879		
T4R3:0, 21200	T4R3:0, 199789	T4R3:0, 2075	T4R3:0, 20621		
T4R4:0, 2121	T4R4:0, 199891	T4R4:0, 194	T4R4:0, 19272		
T4R5:0, 2125	T4R5:0, 20029	T4R5:0, 21952	T4R5:0, 218229		
Muestra 02: Poliestireno (EPS) + líquido ruminal vacuno			Muestra 04: Poliestireno (EPS) + <i>Tenebrio molitor</i>		
T4R1:0, 0761	T4R1:0, 074649	T4R1:0, 0899	T4R1:0, 05533		
T4R2:0, 0769	T4R2:0, 075443	T4R2:0, 0901	T4R2:0, 05552		
T4R3:0, 07659	T4R3:0, 075141	T4R3:0, 091	T4R3:0, 05644		
T4R4:0, 07641	T4R4:0, 074959	T4R4:0, 0908	T4R4:0, 05623		
T4R5:0, 0765	T4R5:0, 075052	T4R5:0, 0907	T4R5:0, 05611		



ANEXO VI. Solicitud de permiso para el uso de laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
FILIAL CELENDÍN



Shuitute s/n – Chacapampa – Celendín - Telefax: 076- 555307 – E-mail: tpereyra@unc.edu.pe

SOLICITO: PERMISO PARA EL USO DE LABORATORIO

SEÑOR DIRECTOR DE LA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL – FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS – UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

S.D.

Yo, Noemí Elizabeth Leyva López, ex alumna de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental, identificado (a) con DNI N°74756902, con CÓDIGO SUNEDU N° 2015810071 con domicilio legal en Jr. Junín N°1580 Celendín teléfono N° 927742850, correo electrónico; nleyval15_2@unc.edu.pe, ante usted con el debido respeto expongo;

Que, teniendo la necesidad de realizar el análisis microbiológico en el laboratorio de la filial Celendín, es que recorro a su Despacho para solicitar el uso del laboratorio de la **EAPIAC** para el desarrollo de mi tesis, trabajo que se realizará entre los meses de mayo, junio y julio del 2023.

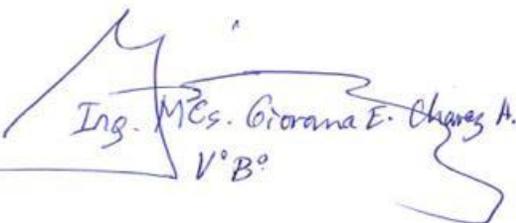
POR LO EXPUESTO

Es justicia que espero alcanzar.

Celendín, 17 de mayo del 2023


 FIRMA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS	
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental de Celendín	
Celendín, 17 de MAYO 2023	
Visto el presente pasó a <i>Laboratorio Química</i>	
<input type="checkbox"/>	Conocimiento y demás fines
<input type="checkbox"/>	Opción info. etc. etc.
<input checked="" type="checkbox"/>	Atención
<input type="checkbox"/>	Programación
<input type="checkbox"/>	So. competencia
<input type="checkbox"/>	Coordinar con
<input type="checkbox"/>	Archivo
<input type="checkbox"/>	Otro
<input type="checkbox"/>	
	
DIRECTOR	


 Ing. M.Cs. Griselda E. Chavez A.
 V°B°