

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Biodegradación de polietileno de baja densidad - PEBD por acción metabólica del lepidóptero *Galleria mellonella* reutilizando residuos de apicultura

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Betty Ullawda Ricce Maldonado
Jeyson Edgar Beraun Pizarro

Asesor:

Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio

Lima, 06 de mayo del 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio, de la Facultad de INGENIERÍA Y ARQUITECTURA, Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: “**Biodegradación de polietileno de baja densidad - PEBD por acción metabólica del lepidóptero Galleria mellonella reutilizando residuos de apicultura**” constituye la memoria que presenta el los Bachiller(es) Betty Ullawda Ricce Maldonado y Jeyson Edgar Beraún Pizarro para obtener el título de Profesional de INGENIERO AMBIENTAL, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 06 días del mes de mayo del año 2022.



Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los **06 días** día(s) del mes de **mayo** del año 2022 siendo **las 08:30 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez**, el secretario: **Ing. Orlando Alan Poma Porras**, y los demás miembros: Mg. Joel Hugo Fernández Rojas y la Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga y el, y el asesor **Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Biodegradación de polietileno de baja densidad - PEBD por acción metabólica del lepidoptero Galleria mellonella reutilizando residuos de apicultura"

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **BETTY ULLAWDA RICCE MALDONADO**

.....b) **JEYSON EDGAR BERAÚN PIZARRO**

conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

(Nombre del Título profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **BETTY ULLAWDA RICCE MALDONADO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	18	A-	MUY BUENO	SOBRESALIENTE


Candidato (b): **JEYSON EDGAR BERAÚN PIZARRO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	18	A-	MUY BUENO	SOBRESALIENTE

() Ver parte posterior*

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente
 Mg. Iliana Del Carmen
 Gutiérrez Rodríguez



 Secretario
 Ing. Orlando Alan
 Poma Porras

 Asesor
 Mg. Jackson Edgardo
 Pérez Carpio

 Miembro
 Ing. Joel Hugo
 Fernandez Rojas

 Miembro
 Mg. Milda Amparo
 Cruz Huaranga

 Candidato/a (a)
 Betty Ullawda

 Candidato/a (b)
 Jeyson Edgar

Biodegradación de polietileno de baja densidad - PEBD por acción metabólica del lepidóptero *Galleria mellonella* reutilizando residuos de apicultura.

Betty Ullawda Ricce Maldonado, Jeyson Edgar Beraún Pizarro

§EP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Perú.

Resumen

La contaminación por plásticos es uno de los problemas ambientales más graves de este siglo, en su mayoría son de un sólo uso, y una vez concluida su vida útil se convierte en contaminante, ya que su descomposición tarda entre 100 a 400 años aproximadamente. El objetivo de esta investigación es evaluar la eficacia de la biodegradación del polietileno de baja densidad (PEBD) mediante la *Galleria mellonella* en el distrito de Pangoa, Junín, Perú. Para el desarrollo del estudio, se acondicionó a la *Galleria mellonella* en tres grupos alimenticios (cera de abeja, dieta balanceada y salvado de trigo), posterior a la etapa de acondicionamiento se desarrolló el tratamiento de biodegradación que consistió en colocar a la *Galleria mellonella* en terrarios con el PEBD, los tratamientos se llevaron a cabo en tres distintos tiempos (24, 36 y 48 horas). Para evaluar la eficacia de la biodegradación se tuvo en cuenta dos análisis: al análisis RAMAN de las muestras de PEBD y la reducción de peso del PEBD tratado. Los resultados del análisis RAMAN indicaron que las muestras de PEBD tratadas presentan una disminución en el nivel de cristalinidad, mientras que la reducción de peso del PEBD indicó que los mejores resultados se dieron a 36 horas y acondicionadas con cera de abeja. En conclusión, el uso de la *Galleria mellonella* para la biodegradación de PEBD es eficaz cuando está acondicionada con cera de abeja y se realiza el tratamiento a 36 horas.

Palabras clave: biodegradación, polietileno de baja densidad, *Galleria mellonella*.

Abstract

Plastic pollution is one of the most serious environmental problems of this century, most of them are single-use, and once their useful life is over, they become polluting, since their decomposition takes approximately 100 to 400 years. The objective of this research is to evaluate the efficacy of low-density polyethylene (LDPE) biodegradation by *Galleria mellonella* in the district of Pangoa, Junín, Peru. For the development of the study, the *Galleria mellonella* was conditioned in three food groups (beeswax, balanced diet and wheat bran), after the conditioning stage the biodegradation treatment was developed, which consisted of placing the *Galleria mellonella* in terrariums with the PEBD, the treatments were carried out at three different times (24, 36 and 48 hours). To evaluate the efficacy of biodegradation, two analyzes were taken into account: the RAMAN analysis of the LDPE samples and the weight reduction of the treated LDPE. The results of the RAMAN analysis indicated that the treated LDPE samples show a decrease in the level of crystallinity, while the weight reduction of the LDPE indicated that the best results occurred at 36 hours and conditioned with beeswax. In conclusion, the use of *Galleria mellonella* for the biodegradation of LDPE is effective when it is conditioned with beeswax and the treatment is carried out at 36 hours.

Key words: biodegradation, low density polyethylene, *Galleria mellonella*.

INTRODUCCIÓN

¿Alguien podría vivir sin plástico en pleno siglo XXI? pues no; ya que gran parte de los objetos que vemos y utilizamos están elaborados de ese material (Cáceres, 2017). Se ha vuelto tan omnipresente que resulta difícil creer que se produce a escala industrial recién desde el año 1950 (Geyer et al., 2017).

Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la contaminación por plástico es uno de los problemas ambientales graves de este siglo (PNUMA, 2012). Estimaciones datan que hasta la fecha se produjo 8.300 millones de toneladas métricas (TM), pero cerca de la mitad se creó a partir del 2004; y del total de plásticos producidos, el 30 % aún sigue en uso; el resto (6.000 millones TM) se ha convertido en residuos (9 % reciclaje, 12 % incinerado y 79 % en vertederos o arrojados al medio ambiente) (Geyer et al., 2017). Con respecto a las bolsas de plástico, en el mundo se utilizan 10 millones de bolsas cada minuto y al año 5 billones, de los cuales se vierten al océano cerca de 5 a 13 millones de toneladas (Ellen MacArthur Foundation; McKinsey, 2016). Con la aparición de la Pandemia ocasionada por la Covid-19 su uso aumentó en gran manera (Flores, 2020).

En Sudamérica, la contaminación por plástico ha ocasionado la formación de “islas de plástico” en el norte del Océano Pacífico, y el 80% de estos residuos provienen de fuentes terrestres (Elías, 2015), es por ello que es de vital importancia encontrar tratamientos adecuados o realizar una buena gestión a este tipo de residuos sólidos (Sáez & Urdaneta, 2014).

Del mismo modo; en Perú los residuos plásticos conforman uno de los tres volúmenes más grande de residuos sólidos municipales debido a su creciente demanda (Gutierrez, 2018). Según el Informe Nacional de Residuos Sólidos, en el 2013 se generaron 4.938.000 toneladas de residuos sólidos domiciliarios en el sector urbano (Ministerio del Ambiente, 2014), 886 toneladas de plástico al día generadas en Lima y Callao (Ministerio del Ambiente, 2017). Actualmente, cada ciudadano utiliza 30 kg de plástico por año y la suma total de bolsas plásticas bordea los 3.000 millones, casi 6 mil bolsas por minuto (Ministerio del Ambiente, 2017); en su mayoría de un sólo uso y una vez concluida su vida útil se convierte en contaminante, ya que su descomposición tarda entre 100 a 400 años aproximadamente tornándose perjudicial su presencia en el Ambiente (Bombelli et al., 2017). Desde el 2016 se cuenta con legislaciones ambientales y planes de gestión integral para tratar este tipo de residuos, en los cuales están involucrados los Ministerios del Ambiente, Salud, Educación, las municipalidades y los gobiernos regionales (Ministerio del Ambiente, 2016b). El 2018, se promulgó la ley que regula el uso de plástico (Ley N° 30884, 2018), sin embargo; por la falta de control y fiscalización, la inexistencia de medidas de control y la ausencia de educación ambiental en la ciudadanía no se ha logrado mucho hasta ahora (Flores, 2020). Por otro lado; el Ministerio del Ambiente cuenta con líneas de investigación que incentivan a realizar este tipo de estudios en favor del medio ambiente, este estudio se encuentra dentro de esta línea de investigación: Componente: *Residuos Sólidos y Peligrosos*; Área temática: *Tratamiento de residuos sólidos y peligrosos*; Línea de investigación: *Tecnologías de tratamiento de residuos sólidos, orgánicos, peligrosos y químicos* (Ministerio del Ambiente, 2016a).

El desarrollo de este estudio propone una alternativa de tratamiento al plástico, así mismo la disminución del volumen de los residuos plásticos que llegan al CEPAP (Relleno Sanitario del distrito de Pangoa) a fin de aumentar la vida útil de las celdas transitorias. El distrito de Pangoa, Satipo, Junín cuenta con una población de 24939 habitantes sólo en la zona urbana; la generación per cápita de residuos es de 0.45 kg/hab/día; y al año se generan 4113.6 toneladas de residuos, siendo el plástico el segundo residuo con mayor generación: 168.2 toneladas al año (Municipalidad Distrital de Pangoa, 2019).

Es por ello, que la investigación se centra en hallar un modo de degradar el polietileno a través de organismos biológicos, en este caso, la biodegradación del plástico a través del “gusano de la cera”.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del lugar de estudio

El presente trabajo se llevará a cabo en el distrito de Pangoa, provincia de Satipo, departamento Junín; bajo condiciones de laboratorio, en el segundo semestre del presente año 2021. El distrito de Pangoa está ubicado a 773 msnm, pertenece a una zona con clima tropical semi-húmedo y posee un área de 6 197 km² (Figura 1).

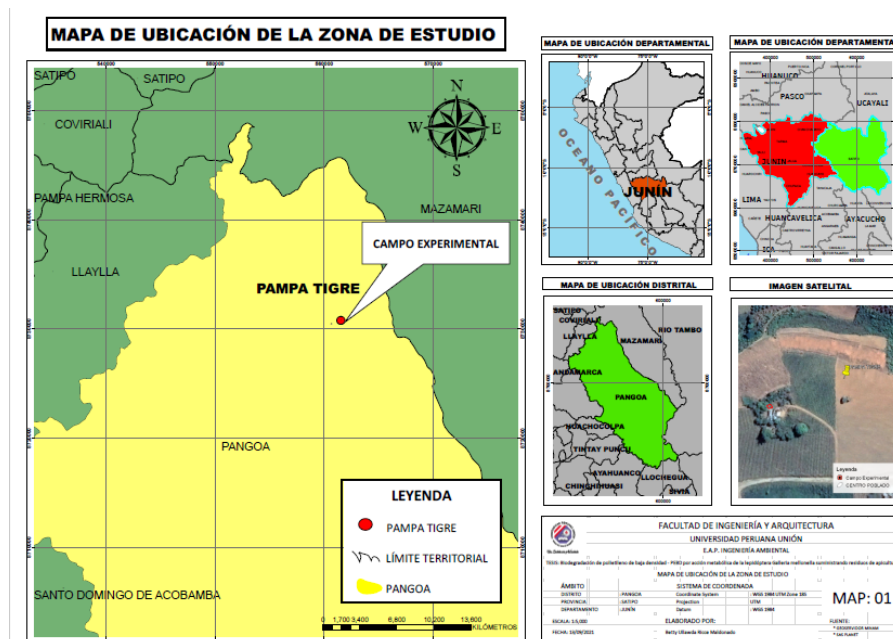


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Materiales y equipos empleados

Los materiales a utilizar tanto para la crianza de la *Galleria mellonella* y para el tratamiento son los siguientes:

- Dieta balanceada (que se preparara con: Salvado de trigo (150 gr), Arroz molido (70 gr), Galletas de cachorro (25 gr), Miel (250 gr), Polen (8 gr).
- Cera de abeja 3 kg
- Salvado de trigo 3 kg
- Bolsa de PEBD
- Retazos de cartón (para colocar los huevos).
- Pinza (para retirar la muestra de PEBD sin alterar o dañarla).
- Guantes de látex (para manipular la muestra sin alterarla).
- Cuaderno de apuntes, lapicero
- Cámara fotográfica
- Terrario (caja de vidrio con medidas: 15 cm de ancho x 20 cm de longitud x 10 cm de altura, cubierto con malla de metal y tela tull)
- Balanza calibrada (para pesar la cantidad de material biodegradado (PEBD)).

Metodología

Este trabajo de investigación se realizará de la siguiente manera:

- Se procederá a acondicionar el área de trabajo, en esta área se tendrán las cajas de madera para la crianza del lepidóptero *Galleria mellonella*. La *Galleria mellonella* se obtendrá de la empresa “Apícola Ayni S.A.C.” para criarlos en tres grupos con un distinto alimento a cada grupo: dieta balanceada, cera de abeja y salvado de trigo (Anwar et al., 2014).
- Cuando la *Galleria mellonella* llegue al estado larvario, etapa en la que la *Galleria mellonella* biodegrada el polietileno de baja densidad-PEBD (ver figura N° 2), se procederá a realizar el estudio.

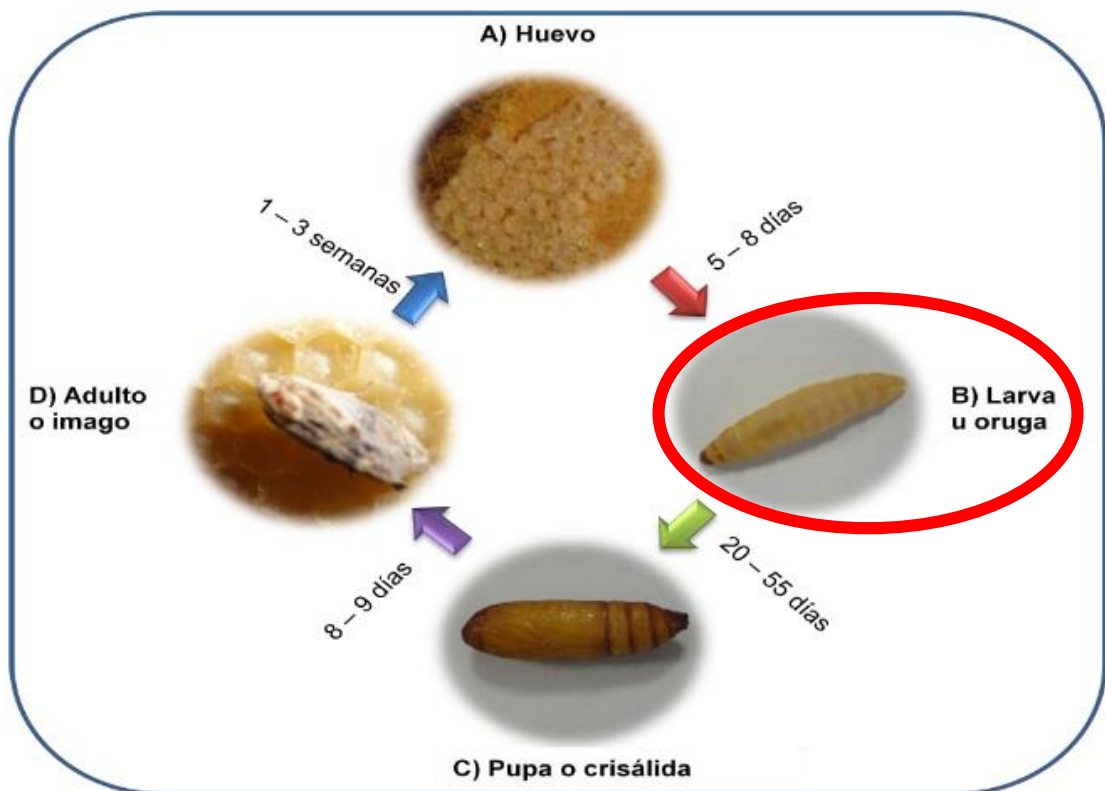


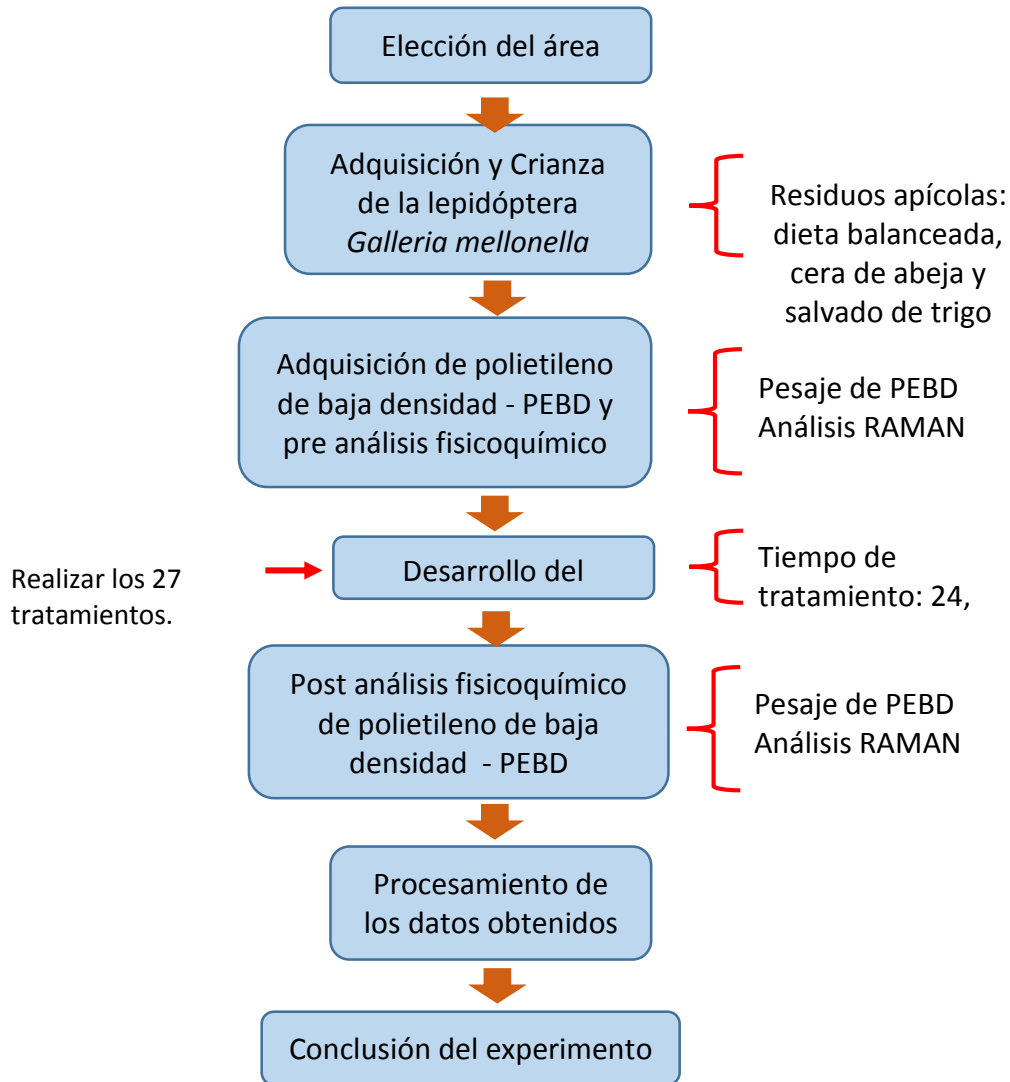
Figura 2. Ciclo biológico de la *Galleria mellonella*.

Fuente: Lucila Adriana Galán Franco (2012).

- Para el desarrollo del estudio se analizará previamente el PEBD, se realizará el pesado y el análisis de laboratorio (RAMAN), posterior a ello se someterá al tratamiento con la *Galleria mellonella* obtenida de los 3 grupos mencionados anteriormente, estos 3 tratamientos se desarrollaran a 3 tiempos distintos (24, 36 y 48 horas) y se realizará 3 repeticiones por cada tratamiento (Bonhomme et al., 2003).
- Posterior al desarrollo del tratamiento, se realizará el pesado final del PEBD y el análisis de laboratorio (RAMAN); para recoger la muestra de PEBD se realizará lo siguiente:
 - ✓ Colocarse los guantes quirúrgicos.
 - ✓ Coger la bolsa de PEBD con una pinza para no alterarla.
 - ✓ Llenar la muestra en una bolsa de seguridad y sellarla. Repetir lo mismo para las 27 muestras.

- ✓ Una vez obtenida las 27 muestras, colocarlas en un cooler para su traslado al laboratorio y realizar los análisis correspondientes. Es muy importante evitar movimientos bruscos durante el traslado.
- Finalmente se procesará los datos obtenidos para la publicación de los resultados.

Diagrama de flujo



Trabajo de gabinete

Los resultados finales como tablas, gráficos y mapas fueron producto del procesamiento de datos de las mediciones de ruido, mediante el empleo de softwares de ArcGis 10.5, Excel 2016 y el SPSS.

Pruebas estadísticas

Se aplicó una prueba de diferencia de medias mediante la prueba no paramétrica Kruskal Wallis, se eligió una prueba no paramétrica debido a que los resultados no presentaban una distribución normal, la prueba Kruskal Wallis se aplicó a un nivel de confianza del 95%.

RESULTADOS

Resultados cuantitativos

Resultado de la disminución de peso del PEBD

Los resultados de los 27 tratamientos realizados en 24, 36 y 48 horas al polietileno de baja densidad - PEBD se muestran en los gráficos 1, 2 y 3. Además, en el Gráfico 4 se muestra el tratamiento que tuvo mayor resultado, tanto en 24, 36 y 48 horas.

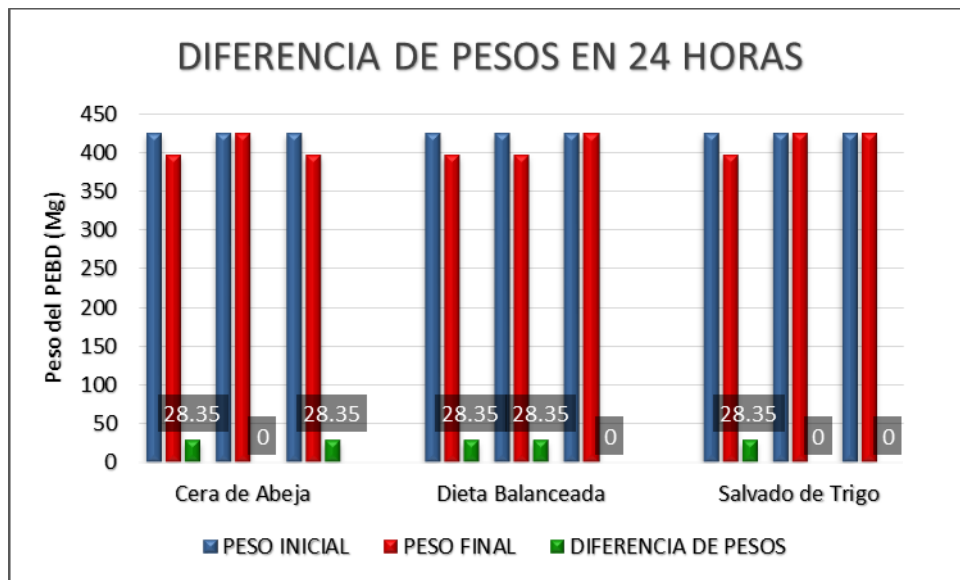


Gráfico 1. Diferencia de pesos de Polietileno de baja densidad - PEBD en 24 horas.

En el Gráfico 1, se muestra los tres distintos tratamientos que se aplicaron a las larvas del “gusano de la cera” (*Galleria mellonella*): cera de abeja, dieta balanceada y salvado de trigo; con tres repeticiones para cada tratamiento.

De la cual, se puede observar que la biodegradación del PEBD tratado con la larva acondicionada con Cera de abeja obtuvo una reducción de peso del 7 % en la primera y tercera repetición, y en la segunda repetición no obtuvo ninguna reducción de peso. La larva acondicionada con Dieta balanceada obtuvo una reducción de peso del 7 % en la primera y segunda repetición, y en la tercera no obtuvo ninguna reducción de peso. La larva acondicionada con Salvado de trigo obtuvo una reducción de peso del 7 % en la primera repetición, y ninguna reducción de peso en la segunda y tercera repetición.

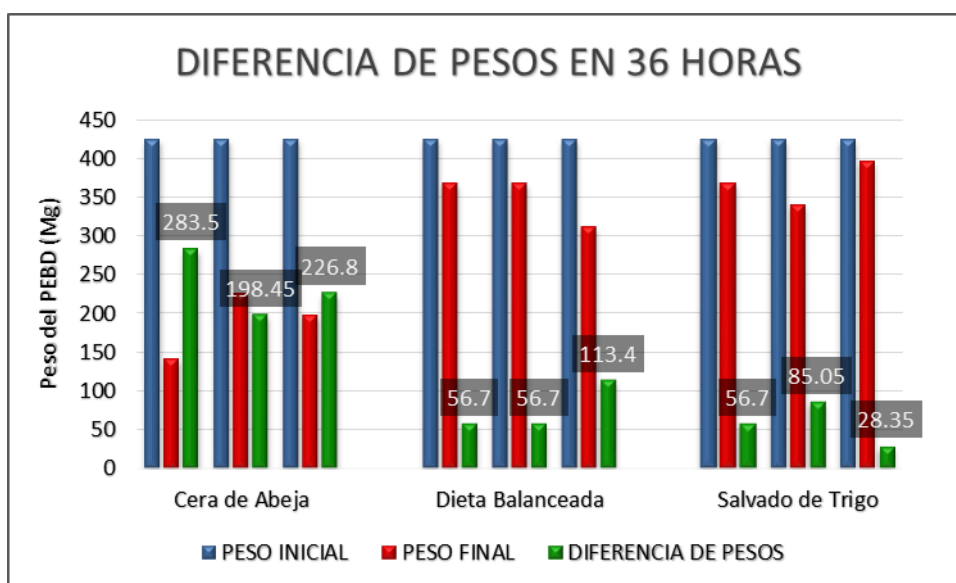


Gráfico 2. Diferencia de pesos de Polietileno de baja densidad - PEBD en 36 horas.

En el Gráfico 2, se muestra los tres distintos tratamientos que se aplicaron a las larvas del “gusano de la cera” (*Galleria mellonella*): cera de abeja, dieta balanceada y salvado de trigo; con tres repeticiones para cada tratamiento.

De la cual, se puede observar que la biodegradación del PEBD tratado con la larva acondicionada con Cera de abeja obtuvo una reducción de peso del 67 % en la primera repetición, 47 % en la segunda y 53 % en la tercera. La larva acondicionada con Dieta balanceada obtuvo una reducción de peso del 13 % en la primera y segunda repetición, y 27 % en la tercera. La larva acondicionada con Salvado de trigo obtuvo una reducción de peso del 13 % en la primera repetición, 20 % en la segunda y 7 % en la tercera.

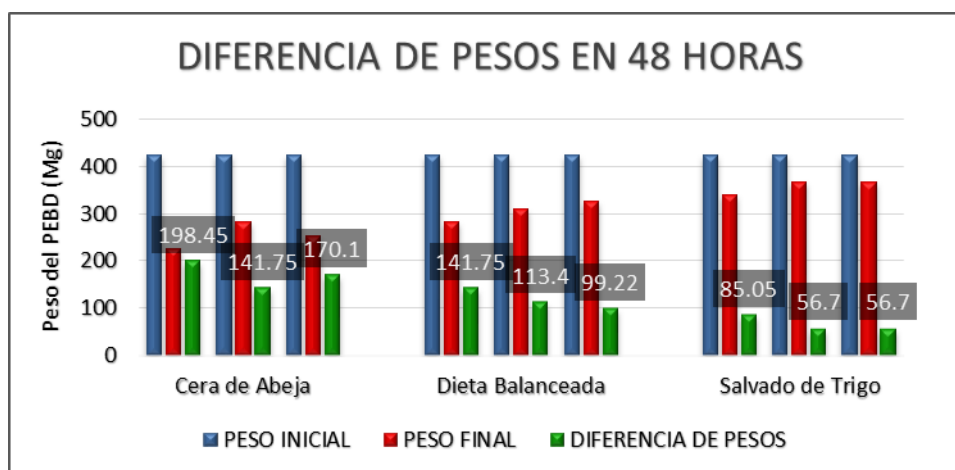


Gráfico 3. Diferencia de pesos de Polietileno de baja densidad - PEBD en 48 horas.

En el Gráfico 3, se muestra los tres distintos tratamientos que se aplicaron a las larvas del “gusano de la cera” (*Galleria mellonella*): cera de abeja, dieta balanceada y salvado de trigo; con tres repeticiones para cada tratamiento.

De la cual, se puede observar que la biodegradación del PEBD tratado con la larva acondicionada con Cera de abeja obtuvo una reducción de peso del 47 % en la primera repetición, 33 % en la segunda y 40 % en la tercera. La larva acondicionada con Dieta balanceada obtuvo una reducción de peso del 33 % en la primera repetición, 27 % en la segunda y 23 % en la tercera. La

larva acondicionada con Salvado de trigo obtuvo una reducción de peso del 20 % en la primera repetición, 13 % en la segunda y tercera.

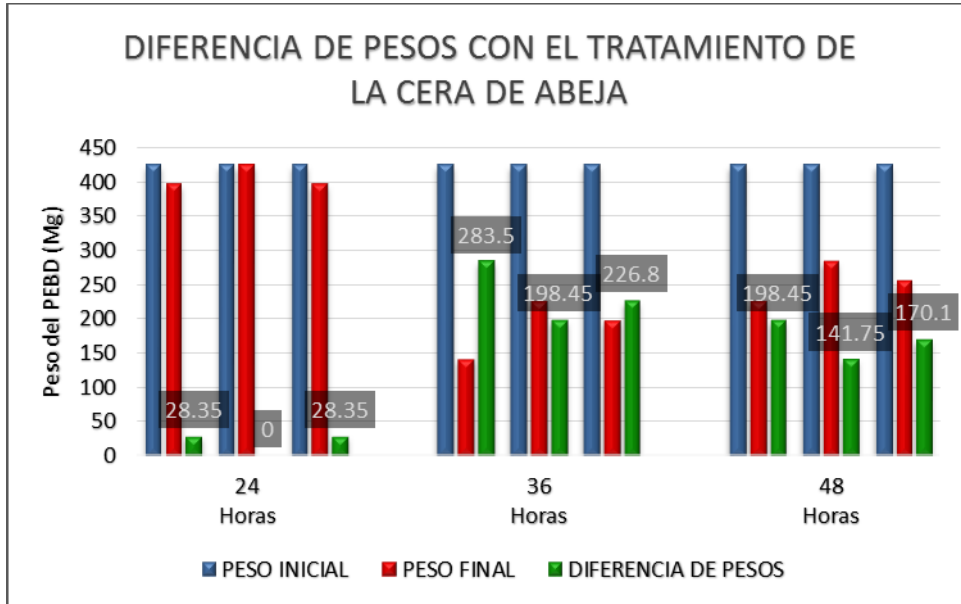


Gráfico 4. Diferencia de pesos de Polietileno de baja densidad - PEBD con el tratamiento de la Cera de abeja, evaluadas en 24, 36 y 48 horas.

En el Gráfico 4, se muestra el tratamiento de las larvas de *Galleria mellonella* acondicionadas con Cera de Abeja con sus respectivas repeticiones y evaluados en 24, 36 y 48 horas.

De la cual, podemos observar que la biodegradación del PEBD evaluada en 24 horas obtuvo una reducción de peso del 7% en la primera y tercera repetición, y en la segunda no obtuvo ninguna reducción de peso. La biodegradación de PEBD evaluada en 36 horas obtuvo una reducción de peso de 67 % en la primera repetición, 47 % en la segunda y 53 % en la tercera. La biodegradación de PEBD evaluada en 48 horas obtuvo una reducción de peso de 47 % en la primera repetición, 33 % en la segunda y 40 % en la tercera.

Esto demuestra que la biodegradación del PEBD es eficaz a 36 horas.

Resultado del análisis RAMAN del PEBD

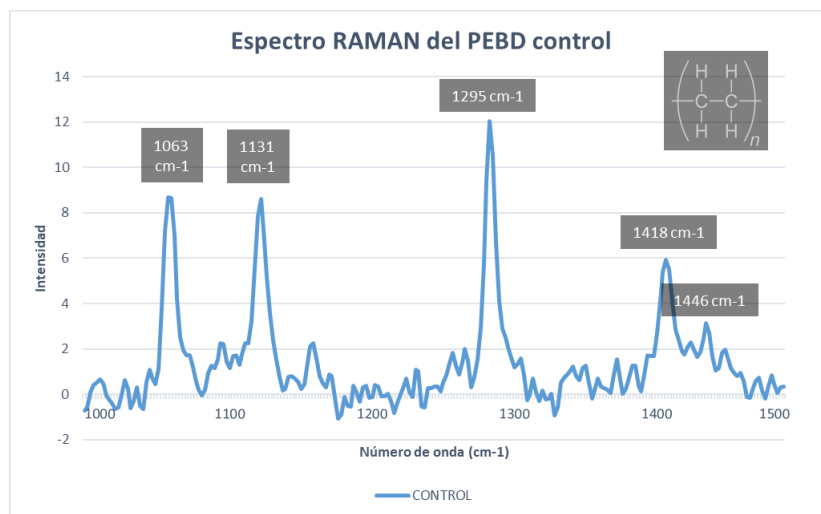


Gráfico 5. Espectro RAMAN del PEBD control

Número de Onda (cm-1)	Grupo funcional
1063	C-C
1131	C-C
1295	CH ₂
1418	CH ₂
1446	CH ₂

Tabla 1. Número de onda y grupo funcional (los valores fueron asignados comparando con los espectros reportados por Raman Spectroscopic Study of High-density Polyethylene during Tensile Deformation) (Kida, Hiejima, & Nitta, 2016).

En el Gráfico 5, se muestra el espectro RAMAN del polietileno de baja densidad (PEBD) control resaltando los picos más significativos y en la Tabla 1 se detalla el grupo funcional obtenidos en los picos. Se tomaron las bandas RAMAN del espectro para la cadena cristalina (1063, 1131, 1295 y 1418 cm-1), estas bandas se utilizan como estándar para comparar las variaciones de la cristalinidad del PEBD) (Kida, Hiejima, & Nitta, 2016).

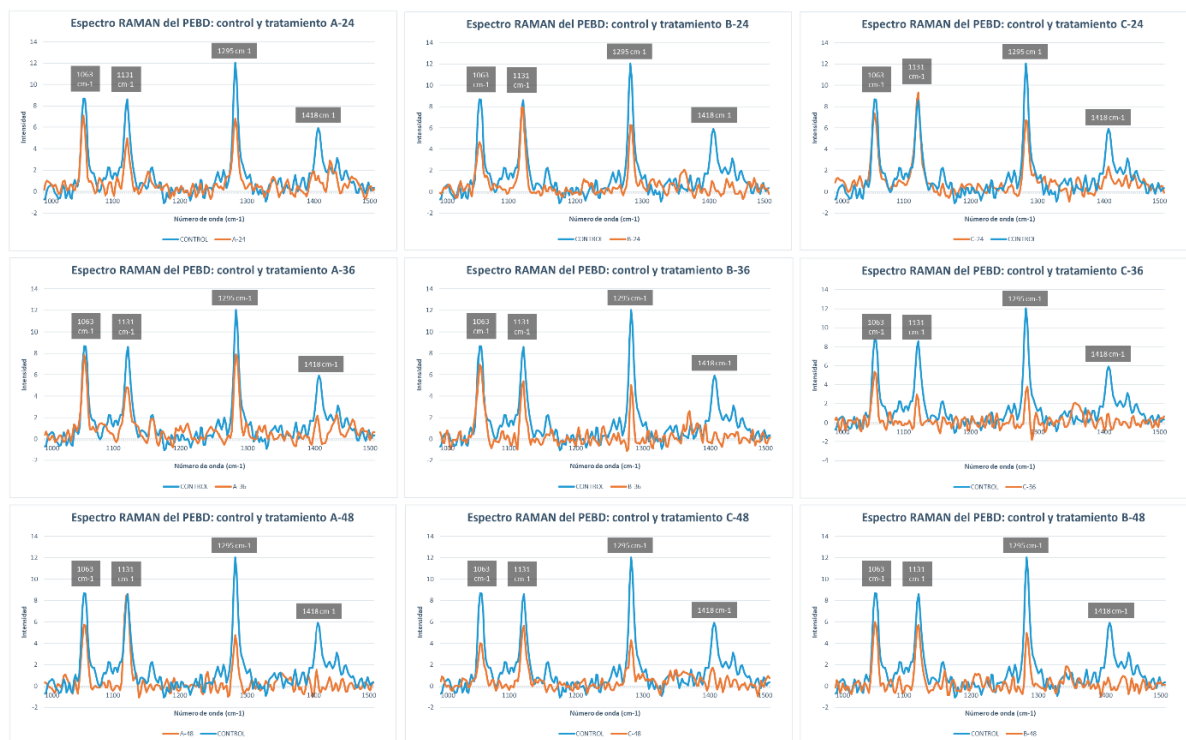


Gráfico 6. Espectros RAMAN de los tratamientos realizados comparados con la muestra control del PEBD.

En el Gráfico 6, se muestran los espectros RAMAN de los tratamientos realizados comparados con la muestra control del PEBD, se puede apreciar que el 100% de los tratamientos se obtuvieron reducción en la intensidad observada en el número de onda 1063 cm-1, el 78% de los tratamientos en el número de onda 1131 cm-1, el 100% de los tratamientos en el número de onda 1295 cm-1 y el 100% de los tratamientos en el número de onda 1418 cm-1. En tal sentido la reducción de la intensidad en estas bandas RAMAN indican una disminución en la cristalinidad del PEBD producto del tratamiento aplicado a las muestras.

Resultado del análisis estadístico de la reducción de peso del PEBD

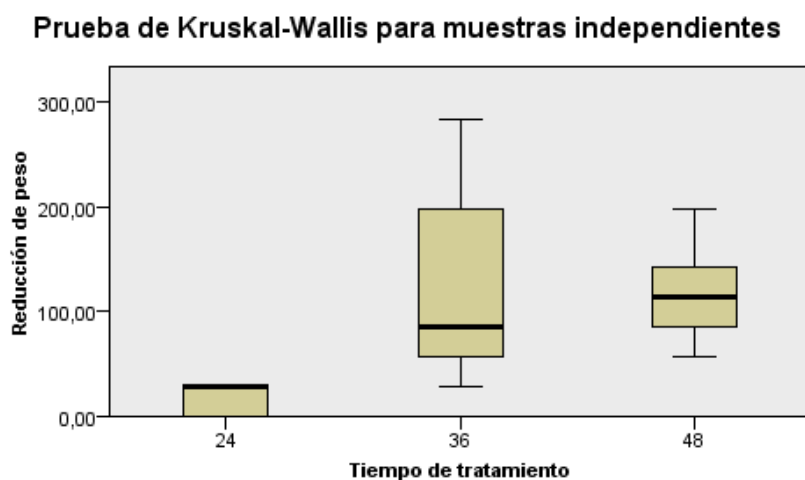


Grafico 7. Resultado de la prueba de kruskal Wallis

El análisis de comparación de medias mediante Kruskal Wallis a un nivel de confianza de 95%, indica que existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos aplicados al PEBD, el Gráfico 9 muestra que la entre los tratamientos de 24 y 26 horas existe diferencia significativa entre las medias, entre los tratamientos de 24 y 48 horas no existe diferencia significativa entre las medias y entre los tratamientos de 24 y 48 horas existe diferencia significativa entre las medias.

Resultados cualitativos

Resultado de los cambios físicos del PEBD



Grafico 8. Consumo de PEBD, Muestra A1- 36.

En el grafico 8, se observa la actividad degradativa de las larvas de *Galleria mellonella*, reflejadas en el consumo del PEBD.

Resultado de Micrografía Óptica del PEBD

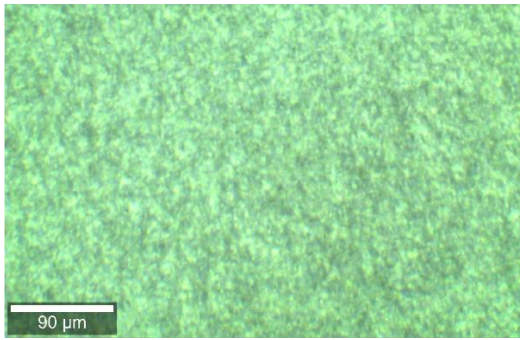


Grafico 9. *Micrografía óptica de la muestra Control.*

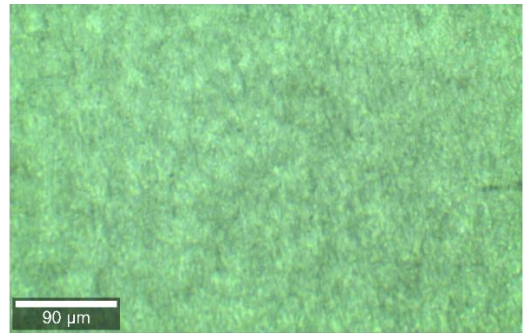


Grafico 10. *Micrografía óptica del tratamiento A1-36h.*

En el grafico 9 y 10, se observa las diferencias que hay entre la muestra control y el tratamiento A1-36h del polietileno de baja densidad-PEBD, se evidencia un ligero cambio en el brillo y la aparición de algunas fisuras. Esto se analizó en el 100 % de la muestra y con un nivel de 90 μm.

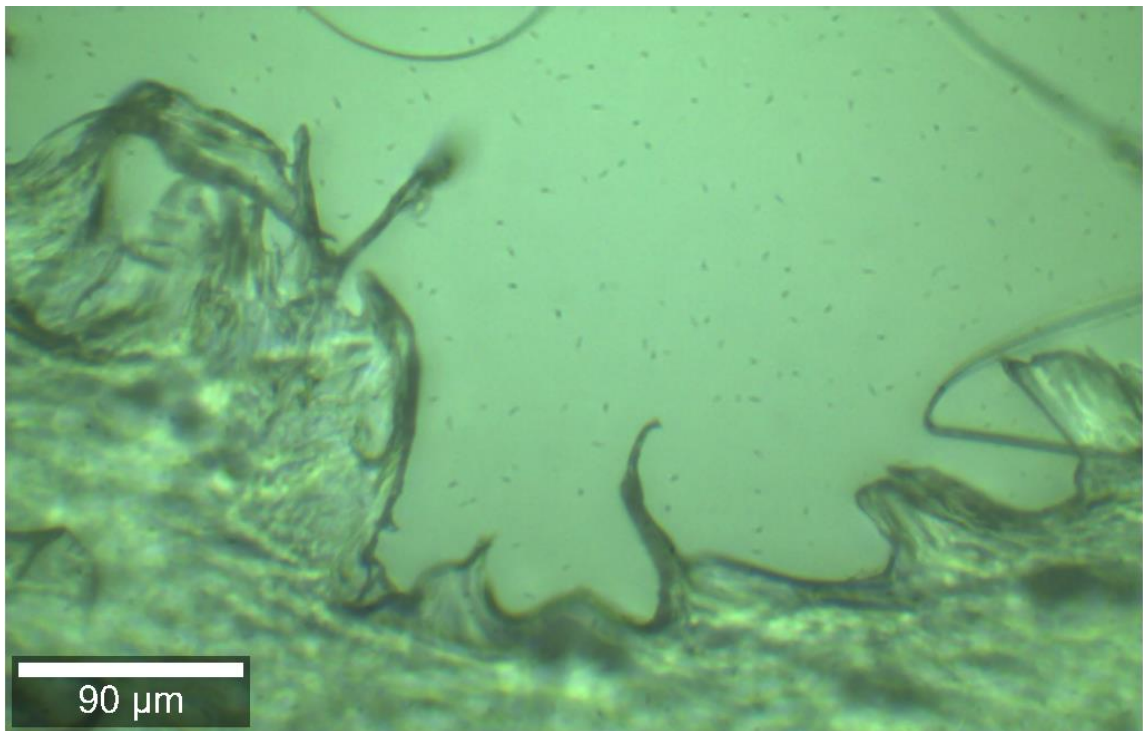


Grafico 11. *Micrografía óptica de la muestra A1-36h-a2: evaluada en la región "a" con un nivel de 23.36 μm.*

El grafico 11, ofrece una vista óptica realizada en los bordes de los agujeros que dejan las larvas de *Galleria mellonella* en la muestra de polietileno de baja densidad-PEBD, esto se analizó en la región "a" con un nivel de 23.36 μm.

DISCUSIÓN

En la presente investigación se obtuvo que 30 larvas del lepidóptero *Galleria mellonella* acondicionadas con “cera de abeja” biodegradaron 283.5 mg (67 %) de polietileno de baja densidad - PEBD en 36 horas a una temperatura de 25 °C y 83 % de humedad relativa, ésta pertenece al Tratamiento A1-36.

Una de las formas para evaluar la eficacia de biodegradación es la cantidad de peso perdido del PEBD, en otras palabras ¿Cuántos miligramos de PEBD consumió la *Galleria mellonella*? Bombelli (2017), menciona que 100 larvas de *Galleria mellonella* son capaces de biodegradar 92 mg de polietileno en 12 horas. Si bien, nosotros extendimos el tiempo a 36 horas pero aplicamos sólo 30 larvas, obtuvimos una mayor cantidad de PEBD biodegradado; en otras palabras, 283,5 mg de PEBD biodegradado, que es mayor, aún si triplicáramos los 92 mg de Bombelli.

Velasco (2017), encontró que 10 larvas de *Galleria mellonella* degradan 0.0210 mg en 12 horas a una temperatura de 25 °C. En nuestro estudio obtuvimos una degradación de 283,5 mg, y es muy alta; esto se debe a que nosotros aumentamos el tiempo y la cantidad de larvas. Sin embargo, mantuvimos la misma temperatura de 25 °C.

Márquez (2019), evidenció que 480 larvas de *Galleria mellonella* acondicionadas a una temperatura de 27 °C y 70 % de humedad relativa biodegradaron 0,173 mg de polietileno en 7 días. Yang (2014), extrajo dos cepas bacterianas del intestino de la *Galleria mellonella* y lo incubó por 60 días, para verificar si eran capaces de biodegradar el PE, y descubrieron que la *Esterobacter asburiae* biodegrada $6,1 \pm 0,3\%$ y *Bacillus sp.* $10,7 \pm 0,2\%$; en este caso, no utilizaron la larva como tal, pero sí las bacterias que trabajan dentro de ella. En ambos estudios se ve que los resultados son menores que los nuestros, además el tiempo empleado para la biodegradación es muy prolongado.

Rivas (2020), dio a conocer que la cucaracha *Periplaneta americana* acondicionada a una temperatura de 35 °C y a 60 % de humedad relativa, biodegrada 0.6 mg de bolsa plástica (PEBD) en 7 días, obteniendo una eficiencia de 7.6 %. Ésta se parece mucho a la *Galleria mellonella*, ya que ambos desarrollan su actividad durante la noche y les gusta las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa.

En comparación con estos estudios, se demuestra que nuestra investigación obtuvo mejores resultados de biodegradación de PEBD en cuanto a pérdida de peso, y tomando en cuenta el tiempo, también resultó relativamente corto.

Por otro lado, la temperatura tuvo un papel importante en la biodegradación del PEBD. Velasco (2017), trabajó con larvas de *Galleria mellonella* a 25 °C y 35 °C, demostrando que la temperatura óptima para llevar a cabo la biodegradación es 25 °C. Márquez (2019), también trabajó con el mismo tipo de larvas a una temperatura de 27 °C. Y Rodríguez (2015) menciona que las larvas de *Galleria mellonella* tienen un desarrollo normal cuando se encuentran a una temperatura de 25 °C y su tiempo de vida oscila entre 28 días. Pero si la temperatura es muy baja, su actividad se torna lenta y su tiempo de vida se prolonga, por el contrario, si la temperatura es demasiado alta, tienen una actividad acelerada y su tiempo de vida se acorta considerablemente. Por esta razón, en nuestro trabajamos a una temperatura de 25 °C.

Respecto a la alimentación y acondicionamiento de la *Galleria mellonella*, nosotros aplicamos cera de abeja, dieta balanceada y salvado de trigo; puesto que, Salas (2015) considera que la mejor dieta para criar a la *Galleria mellonella* contiene salvado de trigo, azúcar y miel. Rodríguez (2015) también incluye en su dieta: afrecho de trigo, arroz, croquetas de can, miel de azúcar y miel de abeja; es por ello, que optamos por estos residuos de apicultura como alimento para criar y acondicionar a la *Galleria mellonella*. Márquez (2019), comprobó que los tratamientos donde se

incluye cera de abeja, tienen un mayor consumo de plásticos, esto se asemeja a nuestro trabajo, ya que el tratamiento con cera de abeja obtuvo mejores resultados.

Coreño (2010) indica que la cristalinidad de los polímeros forma parte fundamental en la solubilidad y permeabilidad de dichos elementos, es decir la reducción de la cristalinidad contribuye a incrementar la solubilidad y permeabilidad; además indica que una reducción de la cristalinidad reduce la densidad del polímero y por ende la resistencia de la misma.

CONCLUSIONES

La evaluación de la reducción de peso y la reducción de la cristalinidad del polietileno de baja densidad mediante la aplicación de la *Galleria mellonella*, en su estado larvario, evidencia la biodegradación del material.

La cera de abeja es el residuo de apicultura que obtiene mejores resultados, ya que al acondicionar a la *Galleria mellonella* con este material, se obtiene un promedio de reducción de peso de 141,75 mg (33 % de reducción).

El tratamiento desarrollado a las 36 horas es el que obtiene mejores resultados con un promedio de reducción de peso del polietileno de baja densidad de 122,85 mg (29 % de reducción).

El tratamiento llevado a cabo a las 36 horas y con la cera de abeja para acondicionar a la *Galleria mellonella* fue el que obtuvo mejores resultados con un promedio de reducción de peso del polietileno de baja densidad de 236,25 mg (56 % de reducción).

RECOMENDACIONES

Se recomienda analizar las heces de las larvas de *Galleria mellonella* para verificar la biodegradación.

Se recomienda hacer más estudios de biodegradación con *Galleria mellonella*, puesto que nosotros encontramos que no solamente degradan PEBD, sino también poliuretano, papel y tela, tal y como lo indicamos en el Anexo 6.

REFERENCIAS

- Anwar, A., Ansari, M., Al-Ghamdi, A., Mohamed, M., & Kaur, M. (2014). Effect of larval nutrition on the development and mortality of *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 40(1), 49–54.
- Ararat, C., & Murillo, E. (2016). Polietileno de baja densidad funcionalizado con un poliéster polioliol altamente ramificado maleinizado. *SciELO*, 12(23), 127–144. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.23.7>
- Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Arkatkar, A., Doble, M., Bhaduri, S., & Uppara, P. V. (2008). Biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Indian Journal of Biotechnology*, 7(1), 9–22.
- Bombelli, P., Howe, C. J., & Bertocchini, F. (2017). Polyethylene bio-degradation by

- caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella*. *Current Biology*, 27(8), R292–R293. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.060>
- Bonhomme, S., Cuer, A., Delort, A.-M., Lemaire, J., Sancelme, M., & Scott, G. (2003). Environmental biodegradation of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 81(3), 441–452. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00129-0)
- Cáceres, P. (2017, July). ¿CUÁNTO PLÁSTICO HEMOS GENERADO DESDE QUE SE INVENTÓ Y DÓNDE HA IDO A PARAR? *La Vanguardia*, 2.
- Ellen MacArthur Foundation; McKinsey. (2016). *The New Plastics Economy_McKinsey*. <https://emf.thirdlight.com/link/u3k3oq221d37-h2ohow/@/preview/1?o>
- Federica Bertocchini. (2017). *Descubren que un gusano es capaz de biodegradar plásticos / Perú | El Comercio Perú*. 24 Abril.
- Flores, P. (2020). La problemática del consumo de plásticos durante la pandemia de la COVID-19. *South Sustainability*, 1(2), e016–e016. <https://doi.org/10.21142/SS-0102-2020-016>
- Galán, L. (2012). *Aislamiento e identificación de hongos entomopatógenos de las diferentes zonas citrícolas de México* [Universidad Autónoma de Nuevo León]. <https://docplayer.es/64203404-Universidad-autonoma-de-nuevo-leon-facultad-de-ciencias-biologicas-instituto-de-biotecnologia.html>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), 25–29. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gutierrez, K. (2018). Influencia de factores ambientales de crecimiento microbiano en la degradación de polietileno de baja densidad por la bacteria *Pseudomona aeruginosa* en Huancayo [Universidad Continental]. In *Universidad Continental*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Glosario de Términos de la Gestión Ambiental Peruana, Ministerio del Ambiente 396 (2012).
- Ministerio del Ambiente. (2014). Sexto Informe Nacional de Residuos Sólidos de la Gestión Municipal y No Municipal 2013. In *Ministerio del Ambiente*. <http://redrrs.minam.gob.pe/material/20160328155703.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2016a). *Agenda de Investigación Ambiental al 2021* (Dirección General de Investigación e Información Ambiental (ed.); Primera Ed). Biblioteca Nacional del Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2016b). Plan Nacional De Gestión Integral de Residuos Sólidos. In *Ministerio del Ambiente*.
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Cifras del Mundo y el Perú*. Minam.Gob.Pe. <https://www.minam.gob.pe/menos-plastico-mas-vida/cifras-del-mundo-y-el-peru/>
- Ley N° 30884, 5 (2018).

- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (L. Wiley (ed.); 2ª Edición, Vol. 21, Issue 3). Editorial Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores.
<https://doi.org/10.21829/azm.2005.2131977>
- Municipalidad Distrital de Pangoa. (2019). *Estudio de caracterización de residuos sólidos 2019 de la Municipalidad Distrital de Pangoa*.
- PLASTIVIDA. (n.d.). *Degradación de los Materiales Plásticos*.
- PNUMA, P. de las N. U. para el M. A. (2012). *Green Economy in Action: Articles and Excerpts that Illustrate Green Economy and Sustainable Development Efforts*.
<http://www.facebook.com/hussein.m.abaza>
- Quinchía, A., & Maya, S. (2015). Degradabilidad de Polietileno de Baja Densidad –LDPE utilizando *Pycnoporus sanguineus* UTCH 03. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 9.
- Rodriguez, L. (2015). *Ciclo Biológico de Galleria mellonella Linnaeus (Lepidoptera:Pyralidae)*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- UNESCO. (1989). *Glosario de términos sobre Medio Ambiente*.
- Uribe, D., Giraldo, D., Gutiérrez, S., & Merino, F. (2010). Biodegradación de polietileno de baja densidad por acción de un consorcio microbiano aislado de un relleno sanitario, Lima, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 133–136. <https://doi.org/10.15381/rpb.v17i1.62>
- Coreño, J., & Méndez, M. (2010). *Relación estructura-propiedades de polímeros*. D.F. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Elías, R. (2015). *Mar del plástico: una revisión del plástico en el mar*. Mar del Plata: Revista de Investigación y Desarrollo Pesquero.
- Ibrahim, M. (2017). Classification of polyethylene by Raman spectroscopy . *Thermoscientific*, 6.
- Kida, T., Hiejima, Y., & Nitta, K.-h. (2016). Raman spectroscopic study of high-density polyethylene during tensile deformation. *International journal of Experimental Spectroscopic Techniques*, 7.
- Márquez, A. (2019). *Viabilidad de la biodegradación de Polietileno y Poliuretano por la polilla de la cera (Galleria mellonella): factores que afectan tasas de degradación y supervivencia*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rivas, J. (2020). *Capacidad biodegradativa de la cucaracha Periplaneta americana (Linnaeus, 1758) sobre la bolsa plástica y el film para la elaboración de abono*. Tingo María: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Sáez, A., & Urdaneta, J. (2014). *Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. Venezuela: Revista Omnia.
- Salas, M. (2015). *Efecto de las dietas artificiales en la crianza de Galleria mellonella L. (Lepidoptera: Pyralidae)*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.

- Velasco, M. J. (2017). *Biodegradación del polietileno de baja densidad, mediante el uso del lepidóptero Galleria mellonella bajo condiciones térmicas controladas en el 2017*. Lima: Universidad César Vallejo.
- Yang, J., Yang, Y., Wu, W.-M., Zhao, J., & Jiang, L. (2014). *Evidence of Polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-Eating Waxworms*. China: Environmental Science & Technology.

ANEXOS



Anexo 1. Dietas para acondicionar a las larvas de *Galleria mellonella*. Preparación de dieta balanceada (Izquierda). Cera de abeja recolectada de la empresa "Apícola Ayni S.A.C." (Derecha).



Anexo 2. Experimento de los tratamientos. Colocación de PEBD y larvas acondicionados con sus respectivos alimentos.



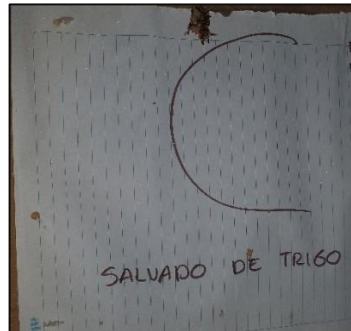
Anexo 3. Retiro de las larvas de *Galleria mellonella* para extraer la muestra de PEBD.



Anexo 4. Evidencia de los tratamientos con sus 3 repeticiones y 3 tipos de alimentos.



Anexo 5. Evidencia del consumo de PEBD por parte de las larvas de *Galleria mellonella*.




Anexo 6. Otras fuentes de alimentación de las larvas de *Galleria mellonella*. Poliuretano (izquierda), Papel (centro), tela (derecha).



Anexo 7. Materiales y equipos utilizados para el estudio. Termo-higrómetro BOECO Germany utilizado para tomar los datos de temperatura y humedad relativa (izquierda), Balanza digital Multi-function Electronic Scale para tomar los datos del peso del PEBD (centro), Cooler para guardar las muestras de PEBD (derecha).

	DIFERENCIA DE PESOS DE PEBD		
	Peso inicial (Mg)	Peso final (Mg)	Diferencia de pesos (Mg)
A1-24	425.25	396.9	28.35
A2-24	425.25	425.25	0
A3-24	425.25	396.9	28.35
B1-24	425.25	396.9	28.35
B2-24	425.25	396.9	28.35
B3-24	425.25	425.25	0
C1-24	425.25	396.9	28.35
C2-24	425.25	425.25	0
C3-24	425.25	425.25	0
A1-36	425.25	141.75	283.5
A2-36	425.25	226.8	198.45
A3-36	425.25	198.45	226.8
B1-36	425.25	368.55	56.7
B2-36	425.25	368.55	56.7
B3-36	425.25	311.85	113.4
C1-36	425.25	368.55	56.7
C2-36	425.25	340.2	85.05
C3-36	425.25	396.9	28.35
A1-48	425.25	226.8	198.45
A2-48	425.25	283.5	141.75
A3-48	425.25	255.15	170.1
B1-48	425.25	283.5	141.75
B2-48	425.25	311.85	113.4
B3-48	425.25	326.03	99.22
C1-48	425.25	340.2	85.05
C2-48	425.25	368.55	56.7
C3-48	425.25	368.55	56.7

Anexo 8. Registro de los datos de pesos de PEBD de todos los tratamientos, fueron registrados en miligramos (Mg).


Laboratorio de Micología y Biotecnología
 Universidad Nacional Agraria La Molina
 Fono 51-1-6147800 Ext.463
 Av. La Molina s/n Lima 12, Perú

La Molina, 01 de diciembre de 2021

Informe descriptivo de medidas por Microscopía Raman Confocal y Microscopía Óptica

Detalles generales del servicio

Tipo de muestras: Bolsas de polietileno de baja densidad (PEBD)
 Número de muestras: 30
 Institución: Universidad Peruana Unión
 Personas de contacto: Betty Racce / Jeyson Beram

Detalles instrumentales

Equipo: Microscopio Raman confocal con AFM
 Modelo: alpha300RA
 Marca: WITec GmbH
 Modo de medida: Medida puntual de espectros Raman y toma de microfotografías ópticas.
 Las muestras analizadas fueron 30 bolsas PEBD cuya denominación se detalla en la Tabla 1.

1. Microscopía Raman Confocal

Las condiciones de medida de los espectros Raman fueron las siguientes:

Detector: Cámara CCD
 Ancho: 1650 píxeles
 Alto: 200 píxeles
 Temperatura: -61 °C
 Espectrómetro: UHTS3005_GREEN_NIR
 Longitud de onda del láser: 784.942 nm
 Potencia del láser: 75 mW
 Fajilla de difracción: 300 g/mm (BLZ=750nm)
 Centro espectral: 1628.473 rel. 1/cm


Laboratorio de Micología y Biotecnología
 Universidad Nacional Agraria La Molina
 Fono 51-1-6147800 Ext.463
 Av. La Molina s/n Lima 12, Perú


1.1. Procedimiento

Las bolsas de PEBD fueron dobladas de tal forma que se acumularon 16 capas y se colocaron entre dos láminas de vidrio portaobjetos, con el fin de tener un mayor espesor de material que arroje una mejor señal (mayor relación señal/ruido). Se fijó la potencia del láser a 75 mW, se midieron y promediaron 30 espectros Raman de 2 segundos cada uno resultando un espectro característico por muestra. Debido a que las láminas de vidrio portaobjetos también arrojan señal Raman formando lomas amorfas en el espectro, éstas se midieron por separado y se restaron a los espectros de las muestras medidas. Asimismo, se realizó el procesamiento de los espectros que consistió en: i) Suprimir los picos debido a rayos cósmicos que impactan en el detector CCD; ii) Suavizar los espectros; iii) Retirar el ruido de fondo (*background*). El espectro resultante se exportó en formato ASCII de dos columnas (Figura 1).



Figura 1. Espectro Raman de la muestra A1-24h.


Por cada una de las 30 muestras, se procesaron y exportaron 2 archivos detallados en la Tabla 2.


Laboratorio de Micología y Biotecnología
 Universidad Nacional Agraria La Molina
 Fono 51-1-6147800 Ext.463
 Av. La Molina s/n Lima 12, Perú

Objetiva: Zeiss EC Epiplan 20x / 0.4
 Número de acumulaciones: 30
 Tiempo de integración: 2.0 s

Grupo	ID
A	24 h
	36 h
	48 h
	24 h
	36 h
	48 h
B	24 h
	36 h
	48 h
	24 h
	36 h
	48 h
C	24 h
	36 h
	48 h
	24 h
	36 h
	48 h
Control	1
	2
	3

Tabla 1. Grupos de muestras analizadas por microscopía Raman confocal y microscopía óptica. Se analizaron tres muestras idénticas de cada grupo.


Laboratorio de Micología y Biotecnología
 Universidad Nacional Agraria La Molina
 Fono 51-1-6147800 Ext.463
 Av. La Molina s/n Lima 12, Perú

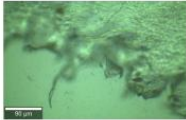



Figura 2. Micrografía óptica de la muestra A2-48h de la región "a" con un nivel de 46.72 µm. Esta imagen fue denominada "A2-48h-a3.tif".

3. Conclusiones

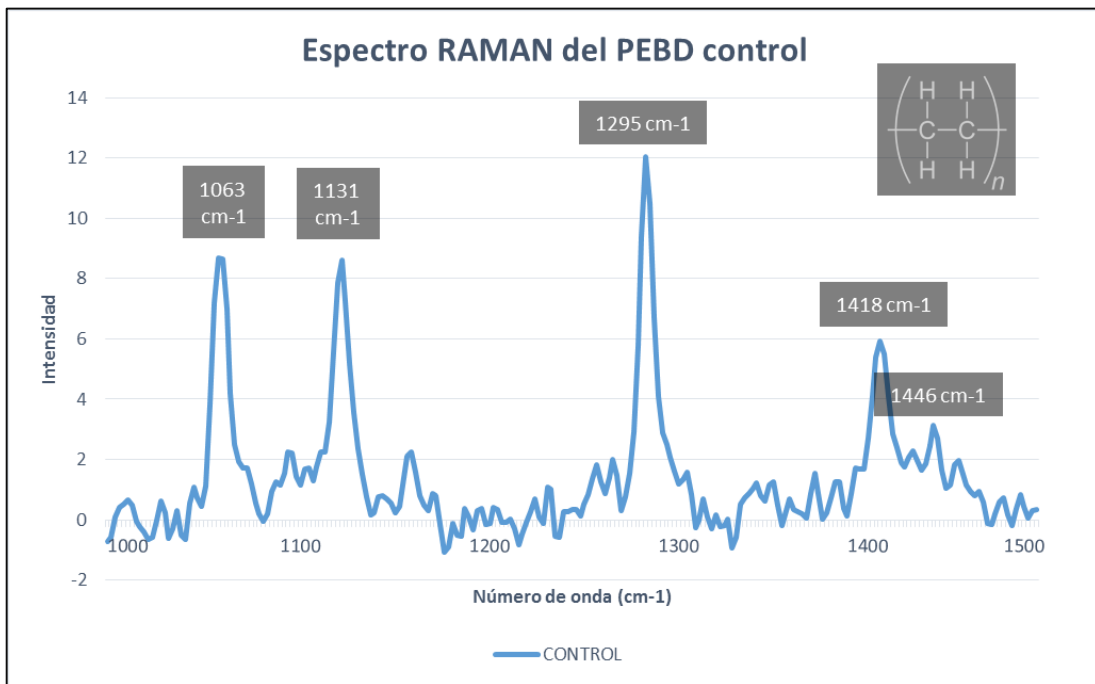
Se pudo notar que, en las muestras en estudio, los picos Raman característicos (1063, 1131, 1295 cm^{-1} aprox.) el ancho a media altura varió con respecto a las muestras control. Por ejemplo, las muestras del grupo Control cuentan con un ancho a media altura de $9.53 \pm 1.06 \text{ cm}^{-1}$ mientras que el grupo A-48h cuenta con un ancho a media altura de $10.03 \pm 2.10 \text{ cm}^{-1}$, lo que indicaría una ligera disminución en la cristalinidad del PEBD producto del tratamiento aplicado a las muestras. Por otro lado, se observaron cambios en las intensidades relativas de los picos antes mencionados, lo que indicaría la reducción de ciertos modos vibracionales en el material en estudio.

Adjunto a este informe descriptivo se envía la carpeta "Medidas UPeU.rar" conteniendo todos los archivos anteriormente descritos.

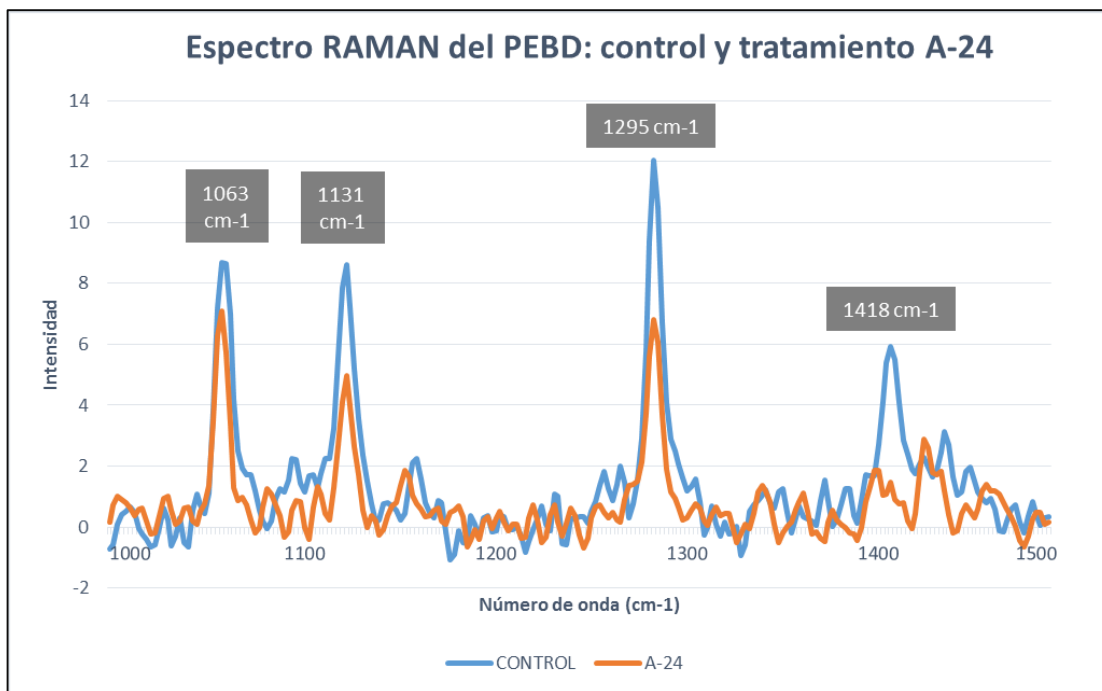

 Tania Samoliski Kleit, Ph.D.

Anexo 9. Informe descriptivo de medidas por Microscopía Raman Confocal y Microscopía Óptica del laboratorio de Micología y Biotecnología de la Universidad Nacional Agraria de la Molina.

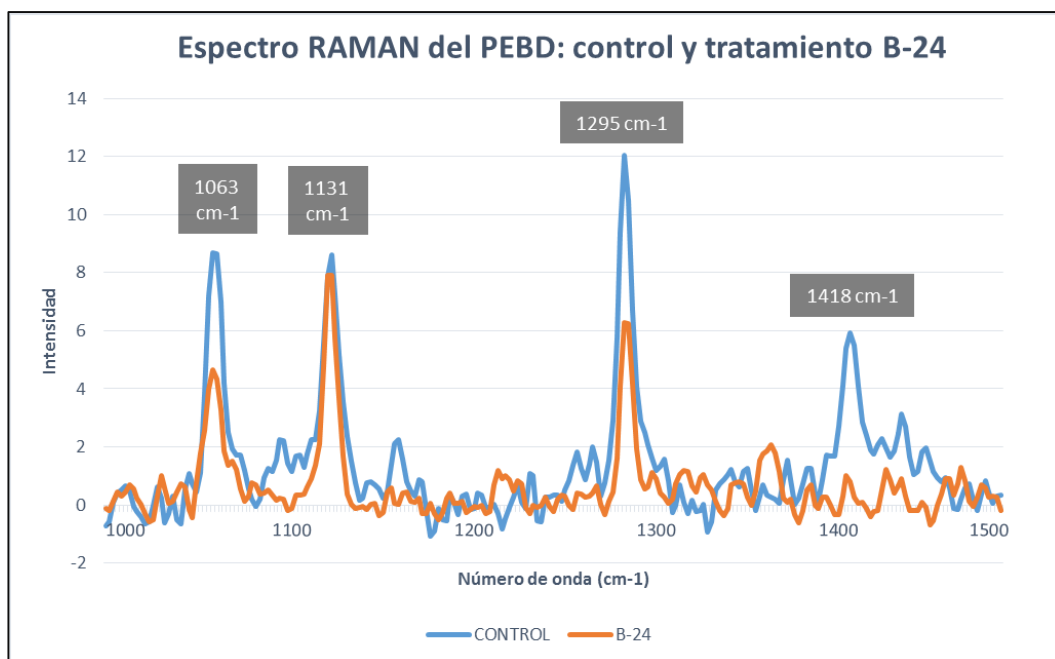
Espectros Raman de todos los tratamientos



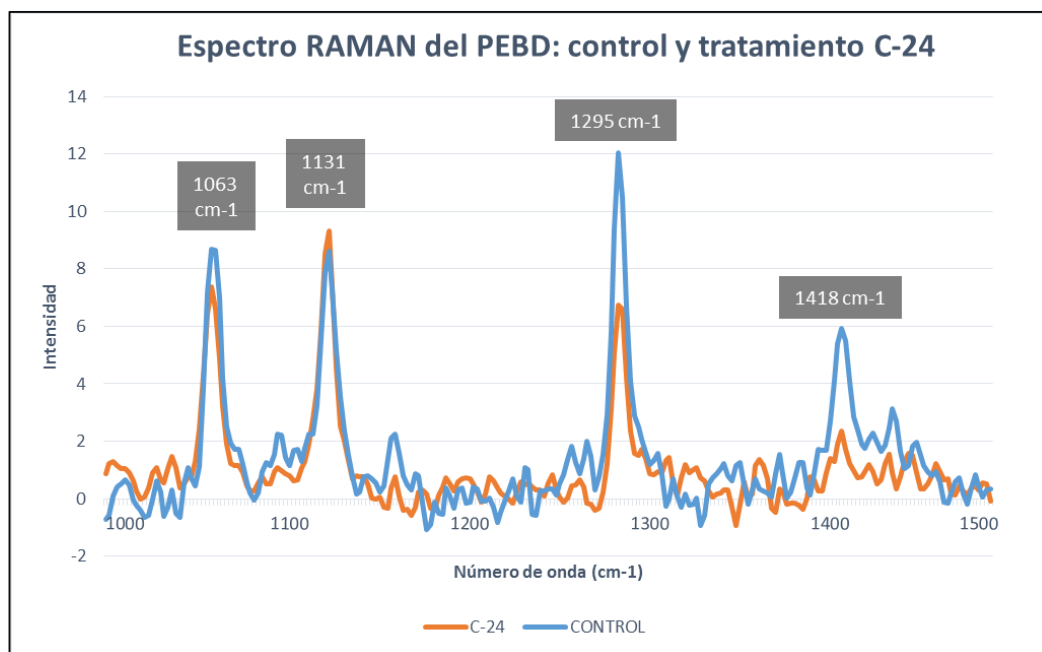
Anexo 10. Espectro Raman del PEBD Control



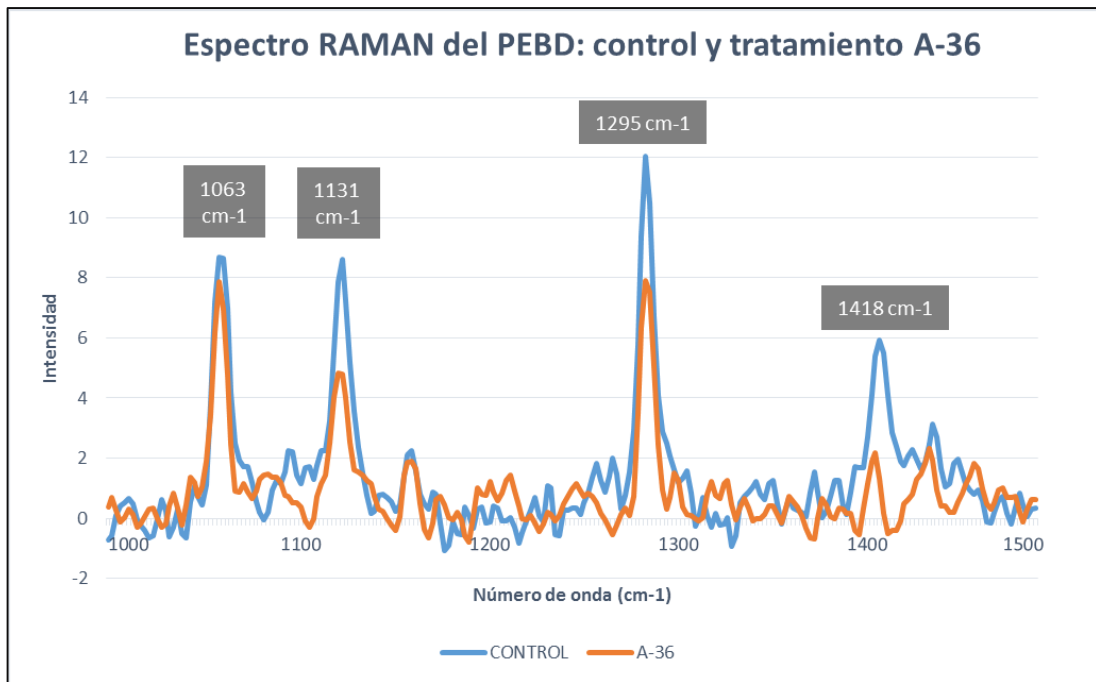
Anexo 11. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento A-24h.



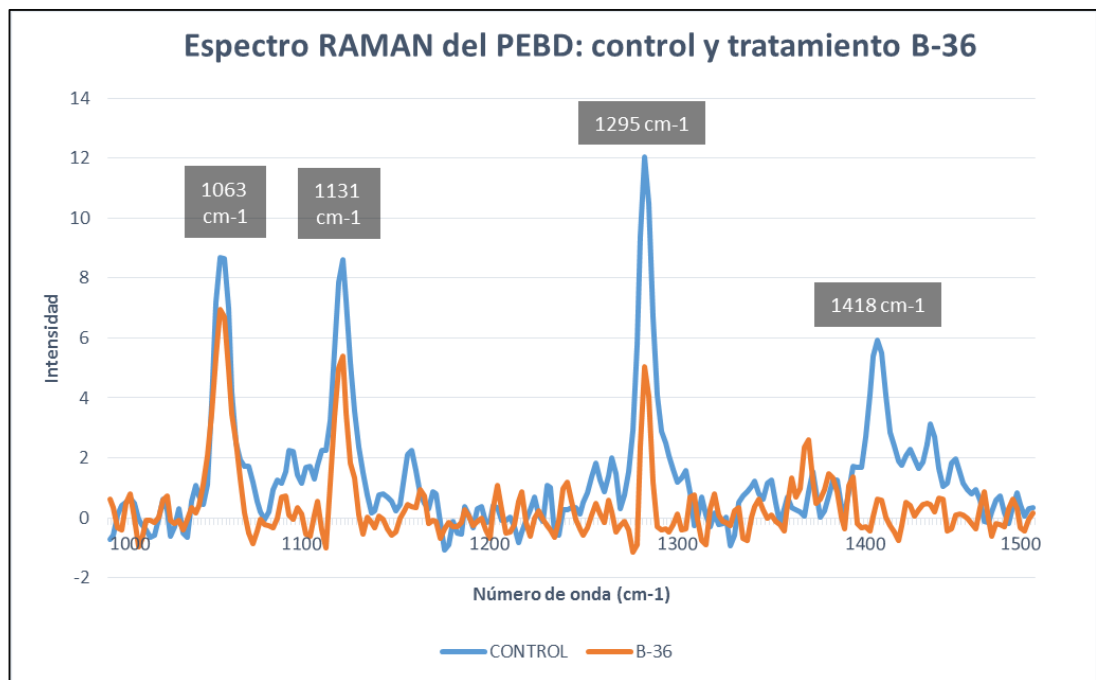
Anexo 12. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento B-24h.



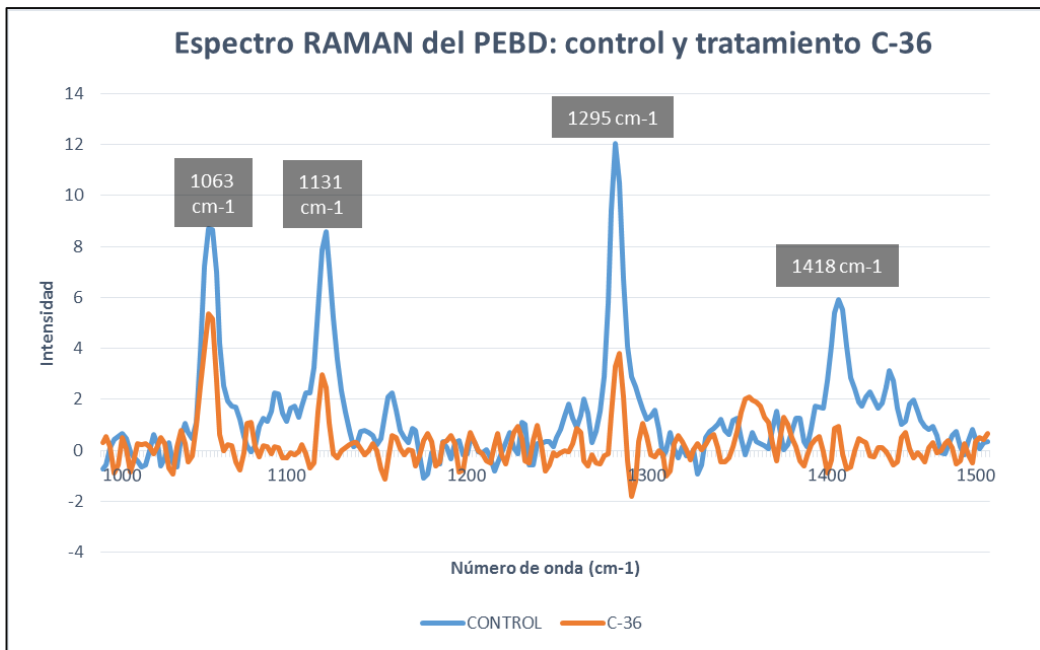
Anexo 13. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento C-24h.



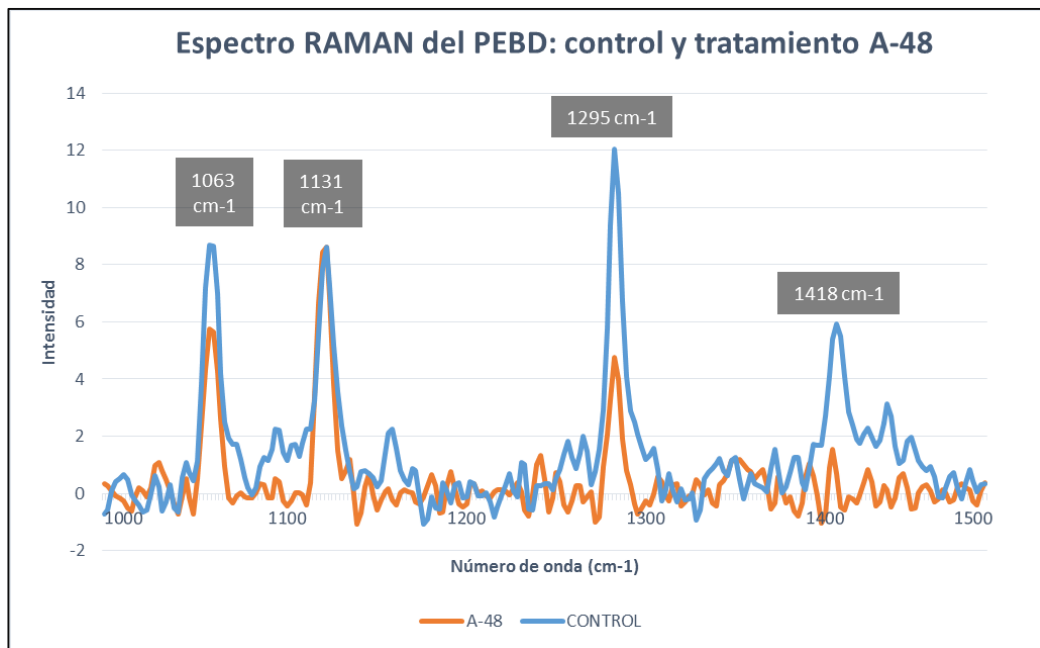
Anexo 14. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento A-36h.



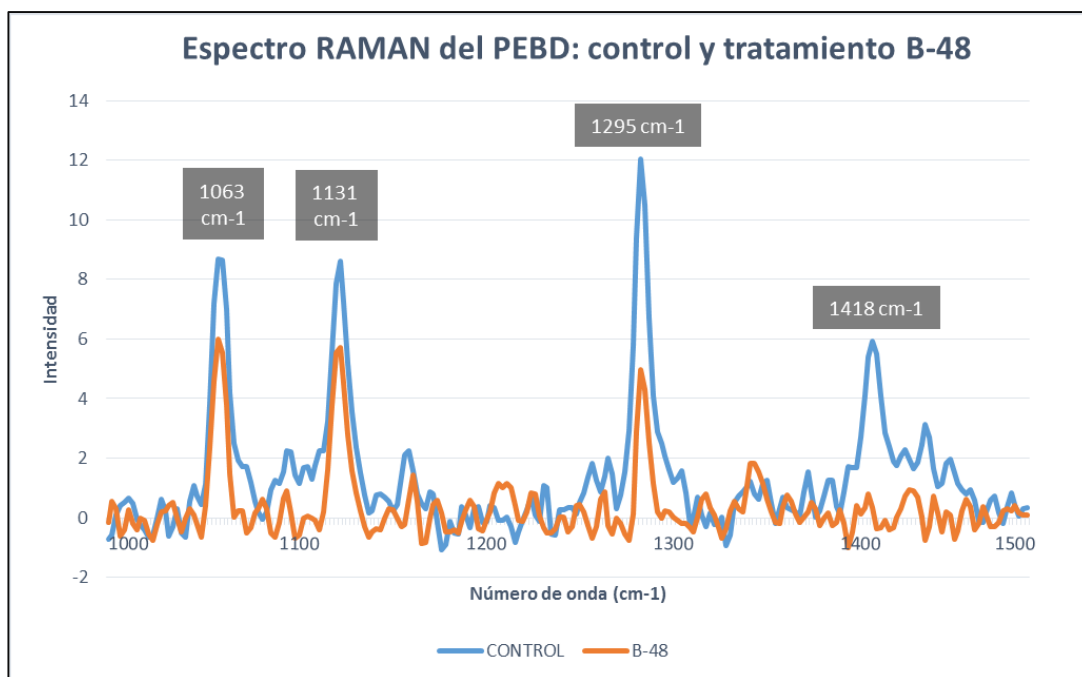
Anexo 15. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento B-36h.



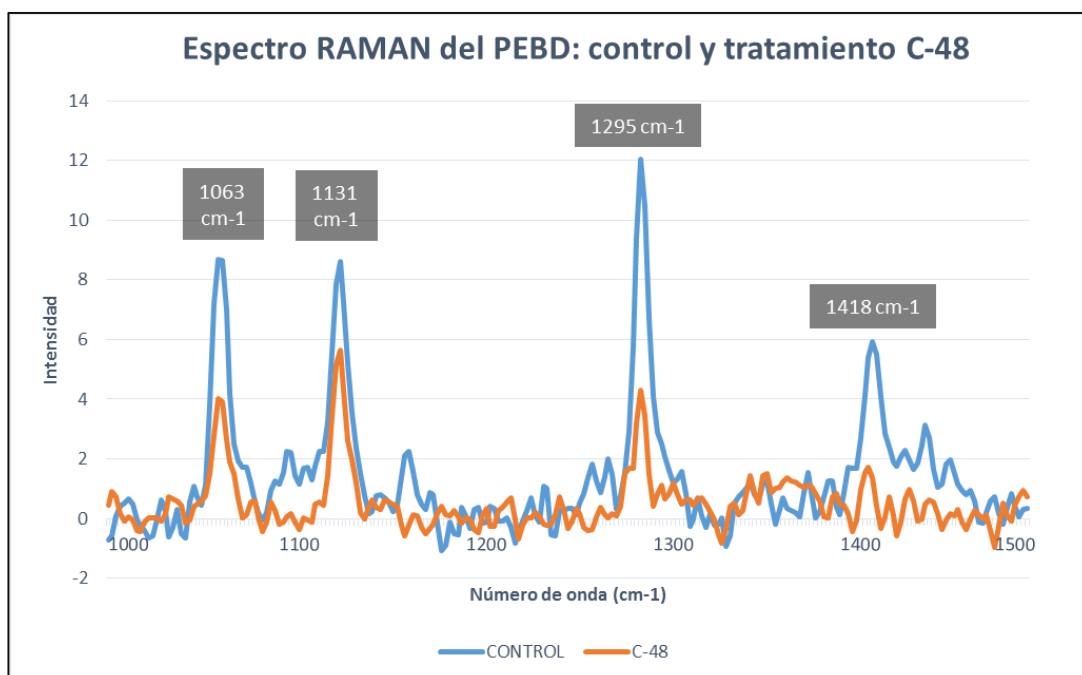
Anexo 16. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento C-36h.



Anexo 17. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento A-48h.



Anexo 18. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento B-48h.



Anexo 19. Espectro Raman para contrastar la diferencia entre el PEBD control y el tratamiento C-48h.