



**Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”  
Departamento de Ingeniería de Procesos y  
Ciencias Ambientales**

## **REPORTE FINAL**

**PROYECTO:**

**DETERMINACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD  
DE PRODUCTOS PLÁSTICOS DE UN SOLO USO  
UTILIZADOS EN EL SALVADOR, ELABORADOS A  
BASE DE RESINAS CON ADITIVOS Y/O RESINAS  
BIOBASADAS.**

**Realizado por:**

Frida Yolanda Monzón  
María Dolores Rovira  
Steffany Gabriela Castañeda  
Oscar Abraham Carías

**San Salvador, octubre de 2022.**

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>ALCANCES</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b> .....	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	<b>16</b>
<b>6.1</b>	<b>Metodología general de análisis DSC</b> .....	<b>16</b>
6.1.1	Equipo y suplementos .....	16
6.1.2	Procedimiento .....	16
<b>6.2</b>	<b>Metodología general para la determinación de contenido de humedad, cenizas, y material orgánico en suelos</b> .....	<b>18</b>
6.2.1	Equipos y materiales.....	18
6.2.2	Preparación de la muestra.....	19
6.2.3	Procedimiento .....	19
6.2.4	Cálculos.....	20
<b>6.3</b>	<b>Metodología general para la determinación de pH en suelos</b> .....	<b>21</b>
6.3.1	Equipos y materiales.....	22
6.3.2	Reactivos.....	22
6.3.3	Procedimiento .....	22
<b>6.4</b>	<b>Metodología para determinación de contenido de nitrógeno</b> .....	<b>23</b>
6.4.1	Equipo.....	23
6.4.2	Reactivos.....	23
6.4.3	Preparación de soluciones.....	24
6.4.4	Procedimiento .....	24
6.4.5	Cálculos.....	25
<b>6.5</b>	<b>Metodología general para la degradación oxidativa o fragmentación de materiales plásticos</b> . .....	<b>26</b>
6.5.1	Equipos y suplementos .....	27
6.5.2	Procedimiento .....	28
<b>6.6</b>	<b>Metodología general para determinación de biodegradabilidad de materiales plásticos</b> . .....	<b>29</b>
6.6.1	Equipos y suplementos.....	29
6.6.2	Reactivos.....	31
6.6.3	Procedimiento .....	31
6.6.4	Cálculos.....	34
<b>7</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
<b>7.1</b>	<b>Resultados fase 1</b> .....	<b>42</b>
7.1.1	Resultados DSC .....	42

7.1.2	Resultados de prueba de biodegradabilidad .....	69
<b>7.2</b>	<b>Resultados fase 2 .....</b>	<b>86</b>
7.2.1	Resultados degradación oxidativa .....	86
7.2.2	Prueba de biodegradabilidad .....	90
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>108</b>



## **1 INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de polímeros sintéticos, fundamentalmente a partir del petróleo, es considerado uno de los grandes avances del siglo XX, debido a sus posibilidades de uso, no solo en la industria sino en la vida cotidiana se han convertido en materiales insustituibles. Entre sus ventajas tenemos que son económicos, livianos, resistentes a la oxidación, inalterables a los agentes atmosféricos, versátiles, aislantes de la corriente eléctrica, entre otras. Sin embargo, estas mismas ventajas pueden ser sus peores inconvenientes. La alta resistencia a la corrosión, al agua y a la descomposición bacteriana los convierte en residuos difíciles de eliminar y, consecuentemente, en un grave problema ambiental en la actualidad. Por ejemplo, el polietileno y el polipropileno (materia prima de muchos empaques y bolsas plásticas), pueden tardar hasta 500 años en descomponerse (Valero-Valdivieso, Ortegón, and Uscategui 2013, 171-180).

La versatilidad de los plásticos ha ocasionado un incremento en su consumo y por ende en su producción, la cual pasó de 70 millones de toneladas en 1980 a 439.75 millones de toneladas en 2019, con una participación del 8.4% para Centro y Suramérica y del 18% para Norteamérica (OECD 2022).

Este aumento de producción conlleva a un aumento en la generación de residuos plásticos que aumenta año tras año, lo que genera un importante reto para la gestión de sus desechos y por lo tanto un aumento a la contaminación del planeta. Según (Vazquez and others 2016) la generación de residuos plásticos oscila entre 9 y el 14% de la masa de residuos sólidos urbanos, los cuales tienen a aumentar directamente en relación al producto interno bruto de cada país y en las grandes zonas metropolitanas. Actualmente, no existe una región en la que sea posible recolectar todos estos desechos, por lo que una parte de ellos siempre escapan al medio ambiente donde pueden permanecer muchos años. Los plásticos de un solo uso, generalmente asociados a empaques y bolsas representan el 36% de todos los plásticos que se utilizan, estos en su mayoría están fabricados de las siguientes resinas no biodegradables: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestirenos (PS) y polietilentereftalato (PET), y son además los que más se infiltran al medio ambiente (Sheldon and Norton 2020, 6310-6322).



Según un informe del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN 2006), en el país para el año 2005 se disponía de 123,253.00 t/anuales de plástico en el mercado nacional, de las cuales se estimó que 106,485.10 t/año se desechan en los desechos sólidos comunes. En el país mucho de estos desechos no tienen una adecuada disposición final y terminan contaminando nuestros ríos y playas tal como se muestra en la figura 1.1



Figura 1.1. Contaminación de la playa en el municipio de Conchagua, La Unión. Fuente: Mendoza [2021]

Lo anterior, inicialmente se consideró únicamente como un problema estético, pero luego se evidenció que afectaban el hábitat de las especies acuáticas, llegando al extremo de encontrarse fragmentos de plásticos en tractos digestivos de peces y aves playeras. En El Salvador, se ha encontrado materiales plásticos fragmentados en la franja litoral, en el área protegida de Los Cóbanos, en playa El Espino y playa Las Flores (Barraza 2017, 45-54).

Por parte del Gobierno Central, a través del MARN, se realiza el Programa Nacional de Recuperación de Plásticos, el cual presentó en el período 2003-2005 un acumulado de 938.4 t.; De los cuales, para el año 2005, se recolectó un total de 755.6 t, que representó el 0.6% del total de plásticos disponibles en el mercado nacional, lo que indica que en nuestro país, existe un gran reto aún para la correcta gestión de estos residuos.

La contaminación por plásticos es un problema global y existen a nivel mundial diferentes propuestas para mitigar los impactos ambientales de este material. Una de las más fuertes es adoptar una economía circular para el plástico (Sheldon and Norton 2020, 6310-6322). Cuando se



habla de economía circular, se hace referencia a un modelo que intenta imitar el funcionamiento circular de la naturaleza. En el mundo natural, los organismos, recursos y materiales hacen parte de ciclos infinitos en el que no se generan desechos, porque todo se transforma y fluye cumpliendo diferentes funciones, en la figura 1.2 puede observarse un esquema de esta propuesta. Esta economía implica favorecer el reúso, el reciclaje y el aprovechamiento energético de estos materiales (Vazquez and others 2016).

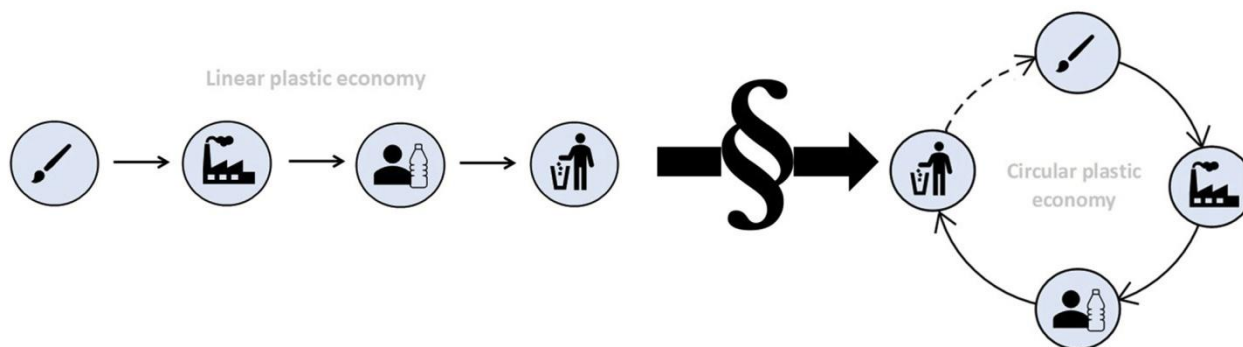


Figura 1.2 De una economía lineal del plástico a una economía circular (Syberg et al. 2021, 100462).

Otra estrategia es buscar materiales plásticos que sean más benignos con el medio ambiente en su producción o cuando se escapan a la naturaleza. El término “bioplásticos” se utiliza para estos materiales, sin embargo, este término es ambiguo, ya que no incluye únicamente a los materiales biodegradables, sino también a resinas tradicionales como PP, PE, PET fabricadas a partir de fuentes de carbono renovables. Debido a sus estructuras estos bio-PE, bio-PP y bio-PET no son biodegradables pero sí contribuyen en su fabricación a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera lo que los vuelve más benignos con el medio ambiente.

Por lo antes mencionado, esta opción de producir nuevos productos plásticos que sean amigables con el medio ambiente, ha llevado a una serie de confusiones en cuanto a los nombres utilizados para ello, encontrando muchos términos que se usan de forma similar como: bioplásticos, plástico biodegradable, biopolímero, plástico biobasado, plásticos compostables, plásticos oxo-degradables, entre otros, lo que puede generar confusión en el consumidor al leer las etiquetas.



Este último término de plásticos oxobiodegradables es otra opción que se discute a nivel mundial, estos se componen de plásticos fabricados de resinas tradicionales derivadas del petróleo como PE, PP, PET a las que se les adiciona en su fabricación ciertos aditivos (generalmente sales metálicas) y esto según la teoría les confiere biodegradabilidad en el medio ambiente (Abdelmoez et al. 2021, 1981-1996). Esta es una alternativa polémica pues algunos autores presentan preocupación sobre el destino de estos polímeros en el medio ambiente cuando se fragmentan, cuestionan su biodegradación completa y la posibilidad de que generen microplásticos que luego se dispersen más fácilmente en el ambiente. Finalmente establecen que estos aditivos eliminan la posibilidad de reciclaje (Fontanella et al. 2013, 875-884; Roy et al. 2011, 4217-4227).

En El Salvador esta última opción de incorporar aditivos a las resinas tradicionales es una de las opciones más adoptadas pues en el mercado muchos productos presentan etiquetas de plástico oxo biodegradable, también se observan etiquetas de bioplásticos a veces sin indicar si se tratan de compuestos biodegradables o simplemente biobasados.

Entonces, ¿Serán todos estos productos del mercado salvadoreño realmente amigables con el medio ambiente? ¿Adicionar algún aditivo en los polímeros será suficiente para la biodegradación de estos? ¿Cuáles son las condiciones requeridas para que estos productos se biodegraden en el medio de disposición final?

Para determinar las características y biodegradabilidad de estos materiales es necesario evaluar la composición y comportamiento de estos materiales, a través de la realización de ensayos normalizados.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

## **2 OBJETIVOS**

Por lo antes expuesto los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

### **✓ Objetivo General**

“Determinar la biodegradabilidad de productos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

### **✓ Objetivos Específicos**

1. Determinar la composición principal de las resinas utilizadas en la elaboración de materiales plásticos de un solo uso, utilizados en El Salvador.
2. Determinar la biodegradabilidad de los productos plásticos de un solo uso, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas
3. Divulgación de resultados de investigación

## **3 ALCANCES**

El proyecto contemplará únicamente la determinación de la composición y biodegradabilidad de bolsas plásticas, elaboradas a base de resinas plásticas con aditivos y/o resinas biobasadas, utilizadas en supermercados o tiendas y empaques plásticos para alimentos.





#### 4 JUSTIFICACIÓN

Los materiales plásticos son ampliamente utilizados en ámbitos de la vida cotidiana, tal como lo muestra la figura 4.1.



Figura 4.1 Utilización de materiales plásticos a nivel global. European Bioplastics.

En la figura 4.1 puede observarse que entre los productos con un alto consumo están: los productos y utensilios para mantener y manipular alimentos; las bolsas para empaques de diversos productos; y las bolsas y depósitos para basura. Estos tres productos, catalogados como de un solo uso o de vida corta, son ampliamente utilizados por muchos consumidores, comercializadores de productos alimenticios, negocios de comida preparada, mercados y supermercados. Una vez utilizados, muchas veces no reciben una disposición final adecuada, esto genera afectaciones estéticas, bloqueo de drenajes, afectación de la fauna y flora de las zonas costeras y marinas y llegan hasta la ingesta indirecta por los humanos, debido a los microplásticos presente en la fauna marina.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

Debido a las demandas mundiales de conservación del medio ambiente, muchos procesadores de estos productos, han cambiado sus materias primas de fabricación, por materiales que sean fácilmente biodegradables o que representen un menor impacto para el medio ambiente.

El problema surge cuando, aprovechando las tendencias de uso de materiales con la etiqueta de amigables con el medio ambiente y la falta de información por parte de los consumidores, se comercializan como “plásticos biodegradables”, sin especificar realmente el tiempo de degradación o las condiciones reales bajo la cual se da este proceso. Es importante por lo tanto en el país contar con un laboratorio que sea capaz de realizar ensayos de biodegradabilidad de materiales plásticos. Al finalizar este proyecto el laboratorio de polímeros de la UCA contará con una metodología implementada, que permitirá seguir estudiando el comportamiento de otros materiales.



## 5 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La degradación de un plástico se define como un cambio en su estructura química que resulta en una modificación apreciable de sus propiedades, y se conocen cinco mecanismos básicos de degradación (Zeenat et al. 2021, 101538):

- Fotodegradación: Degradación del polímero debido a radiación UV proveniente del sol, los enlaces C-C de la superficie del polímero se rompen con la radiación UV.
- Oxidación catalítica: La transformación de residuos plásticos a hidrocarburos es un campo de gran interés, la degradación catalítica de poliolefinas produce aceites y gases. Utilizando este tipo de degradación pueden obtenerse productos específicos de gran calidad que pueden ser reutilizados como materias primas de otros procesos.
- Degradación térmica: A altas temperaturas algunos polímeros como el polietileno se despolimerizan formando de nuevo sus monómeros.
- Degradación mecánica: Consiste en la ruptura de las cadenas de los polímeros a través de estrés mecánico.
- Degradación mediante microorganismos (bacterias, hongos o algas): Cambio físico y químico del material causado por la acción de microorganismos. Este tipo de degradación puede ser aerobia o anaerobia. En la degradación aerobia los microorganismos degradan grandes moléculas en compuestos más pequeños utilizando el oxígeno como captor de electrones. Los productos finales de la biodegradación aerobia son:  $\text{CO}_2 + \text{Agua} + \text{Biomasa}$  (más microorganismos). En la biodegradación anaerobia las bacterias anaerobias no utilizan oxígeno para la degradación, los productos finales de la degradación son:  $\text{Agua} + \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{Biomasa}$  (más microorganismos). En la Figura 5.1 se muestra el mecanismo de acción de la biodegradación



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

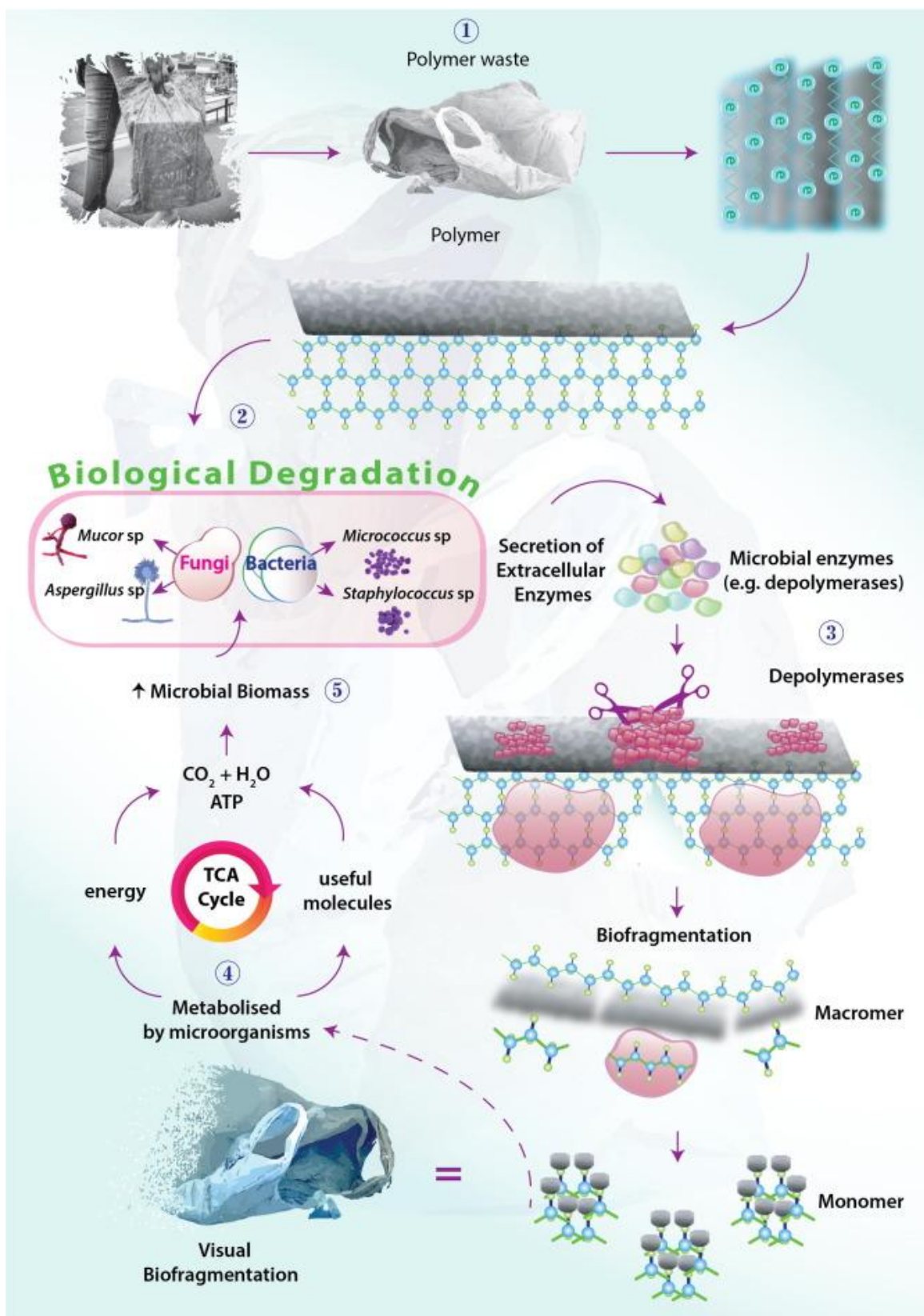


Figura 5.1 Esquema de biodegradación de un polímero (Zeenat et al. 2021, 101538)



La biodegradación de los polímeros consiste en varias etapas como puede verse en la Figura 5.1, el primer paso es que los organismos se adhieran a la superficie del polímero, estos microorganismos excretan enzimas extracelulares que ayudan a cortar los polímeros en moléculas más pequeñas. A esta reducción de tamaño del polímero se le conoce como despolimerización. Estas moléculas más pequeñas son asimiladas por los microorganismos que las utilizan como fuente de carbono, metabolizándolas a productos como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , a esta etapa se le conoce como mineralización.

Sin embargo debido a que en la estructura de muchos polímeros no hay grupos hidrolizables la biodegradación de estos es una tarea difícil pues el primer paso de despolimerización no ocurre. Este primer paso puede verse favorecido por efectos como la degradación térmica o la radiación UV (Zeenat et al. 2021, 101538). Existen diferentes formas para evaluar el grado de biodegradabilidad de un plástico como por ejemplo: evaluar si las propiedades superficiales del plástico han cambiado, evaluar si las propiedades mecánicas del material han cambiado, se puede analizar la evolución de generación de  $\text{CO}_2$  o la velocidad de consumo de oxígeno. Existen normativas que describen procedimientos para realizar estos ensayos (ASTM International 2018b; ASTM international 2018).

Por lo tanto no a todos los plásticos se les puede llamar biodegradables, de hecho existe bastante confusión en los términos aplicados a los plásticos que pueden ser amigables con el medio ambiente. A continuación se aclararán diferentes conceptos para ayudar a esclarecer dicha nomenclatura.

La norma ASTM D6400-19 (ASTM International 2019) define como Plástico Biodegradable, aquel plástico degradable en el que la degradación resulta de la acción de microorganismos de origen natural como bacterias, hongos y algas. Mientras que un Plástico Compostable, el plástico que sufre degradación biológica durante el compostaje para producir dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa a un ritmo consistente con otros materiales compostables conocidos y no deja residuos tóxicos visibles.



Para la European Bioplastics (European Bioplastics 2015), los Bioplásticos se refieren a materiales que son biobasados, biodegradables o ambos. El término Biobasado, significa que el material o producto se deriva (parcialmente) de la biomasa. Hay muchos recursos naturales de donde se originan los polímeros biobasados. Estos incluyen celulosa, almidón, quitosano y proteínas de origen animal y vegetal (Abdelmoez et al. 2021, 1981-1996). Esto implica que un material bioplástico no necesariamente es biodegradable pues en su definición se incluyen materiales que tienen una estructura difícil de degradar por los microorganismos pero que el carbono del que está constituida su estructura proviene de fuentes renovables, lo que reduce su huella en el medio ambiente, por lo anterior a este tipo de plástico se le llamaría biobasado o bioplástico pero no biodegradable. Ejemplos de bioplástico biodegradable y biobasados son el ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxialcanoatos (PHA) (Vazquez and others 2016).

Hay una percepción con frecuencia que lleva a considerar que, debido a su origen, los plásticos biobasados son intrínsecamente mejores para el ambiente, sin considerar el proceso que les da origen y las afectaciones generadas por el mismo (Vásquez, Beltrán, Espinoza, & Velasco, 2016). Es importante por lo tanto recalcar que la biodegradabilidad de un plástico depende de su estructura química y no del proceso o la materia prima utilizado en su fabricación.

La figura 5.2 es una representación gráfica, según la European Bioplastics, de cómo se clasifican los plásticos más utilizados en la industria del plástico como: PE (Polietileno), PET (Tereftalato de polietileno), PA (Poliamida), PTT (Trimetil tereftalato), PLA (Acido polilático), PHA (Polihidroxialcanatos), PBS (Polibutilenosuccinato), PP (Polipropileno), PBAT (Butilén adipato-co-tereftalato) y PCL (Policaprolactona).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

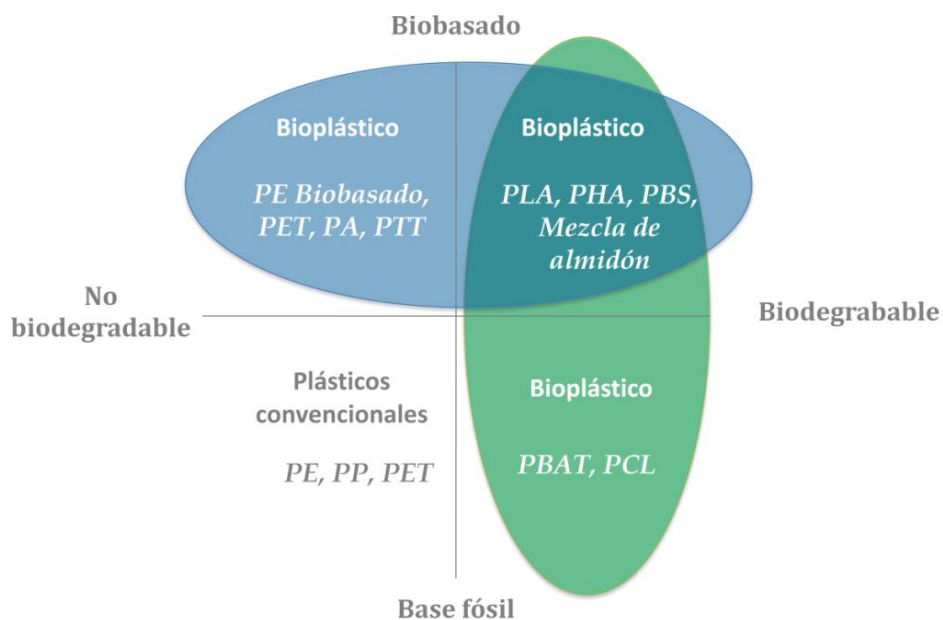


Figura 5.2. Sistema de coordenadas de materiales bioplásticos. Fuente (European bioplastics, 2018)

Otro concepto es el de los Plásticos Oxo-biodegradables, de acuerdo con la European Bioplastics (European Bioplastics 2015), están hechos de plásticos convencionales y se complementan con aditivos específicos para facilitar la biodegradación, estos aditivos se incluyen en la fabricación del producto y se espera que luego en el medio ambiente facilite su degradación. En realidad, estos aditivos sólo facilitan una fragmentación de los materiales, que no se degradan completamente, sino que se descomponen en fragmentos muy pequeños que permanecen en el medio ambiente, un proceso que sería descrito con mayor precisión por el término "oxofragmentación".

Los aditivos agregados a los plásticos clasificados como oxo-degradables, realizan sobre el producto una catálisis química, por medio de la cual, metales de transición como el cobalto, manganeso y hierro, causan la fragmentación del plástico como resultado de una oxidación de las cadenas del polímero, provocada por la exposición al calor o la radiación ultra violeta (European Bioplastics 2015).



No cabe duda de que la incorporación de oxo-aditivos en la cadena del polímero no biodegradable produzca nuevos plásticos que, expuestos a la humedad y la luz solar, se fragmentan en finos trozos (proceso abiótico) como se observa en la figura 5.3. El tiempo de degradación (fragmentación) a veces es impredecible ya que depende de factores climáticos como la temperatura y la intensidad de la radiación solar. Después de la fragmentación, el plástico puede volverse invisible (pero aún existe en el medio ambiente). Estos diminutos fragmentos también preocupan por el impacto en el medio ambiente. Después del primer paso de fragmentación (abiótico), viene el segundo paso de biodegradación (biótico); en este paso, el microorganismo procesa los productos de degradación (Abdelmoez et al. 2021, 1981-1996).

Existen preocupaciones sobre si los plásticos oxo-degradables son totalmente biodegradables debido al destino medioambiental de los residuos de polímero después de la fragmentación. Además, se ha logrado determinar que los plásticos oxo-degradables no son adecuados para los medios de compostaje y no son reciclables (Abdelmoez et al. 2021, 1981-1996).

La biodegradabilidad completa de los plásticos oxo-biodegradables probablemente ocurre una vez que el peso molecular está por debajo de 5000. El peso molecular puede alcanzar este rango si el plástico permanece durante no menos de 1 año en el medio ambiente, que tiene calor, actividad bacteriana y humedad. En este nivel, el polímero ya no existe y es una amplia gama de especies oxidadas discretas. Las bacterias y los hongos consideran que estas especies son adecuadas para una fuente de carbono que puede asimilarse en el ciclo de vida, lo que da como resultado la formación de biomasa y CO<sub>2</sub> en condiciones aeróbicas.



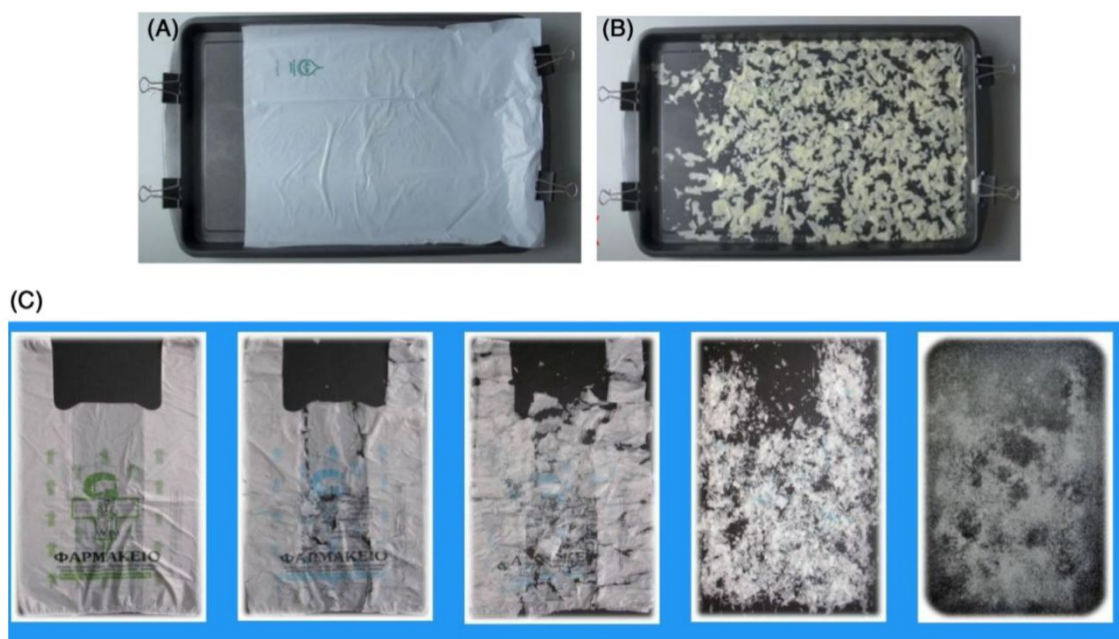


Figura 5.3 Los productos de oxidación de bajo peso molecular se forman rápidamente: (A) bolsa de plástico oxo-degradable en el tiempo cero, (B) bolsa oxo-degradable después de 24 meses y (C) estudio de Reverte de bolsa de un solo uso. Fuente (Abdelmoez et al. 2021, 1981-1996).

El proceso de biodegradación se ve desafiado por la reducción del peso molecular, ya que este proceso no puede garantizarse. Si una bolsa oxo-biodegradable llega al suelo antes de la reducción del peso molecular, puede permanecer durante décadas antes de biodegradarse. Además aunque ocurra la fragmentación para que ocurra la biodegradación deben cumplirse ciertos requisitos, como lo presencia de microorganismos y condiciones ambientales específicas de humedad, temperatura, entre otras. Por lo que para considerar a un plástico como biodegradable debe garantizarse que alcance una mineralización completa en un tiempo establecido (Vásquez, Espinosa, Beltrán, & Velasco, 2016).

Además, la investigación publicada sobre la biodegradación del plástico oxo-biodegradable en el medio marino es escasa. Existe la preocupación de que los microfragmentos oxo-biodegradables lleguen al mar debido al riesgo de que los peces absorban plástico cuando los tamaños de plástico se vuelven más pequeños.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

Según Abdelmoez, et al (2020) no existe ningún estudio previo que haya reportado una biodegradación 100% completa del plástico oxobiodegradable. En 2018 se prohibió en Europa el uso de dichos materiales, esto sugiere el uso restringido de plásticos oxodegradables en el futuro.



## **6 DISEÑO METODOLÓGICO**

El proyecto de investigación se desarrolló en dos fases. La primera fase se realizó de enero del 2021 hasta enero 2022. Consistió primero en la identificación y caracterización de los polímeros presentes en muestras plásticas de bolsas comerciales, mediante la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y luego en la evaluación de biodegradabilidad de estas mismas muestras. En la segunda fase que se realizó de febrero de 2022 a noviembre 2022 se trabajó con muestras de bolsas con etiquetas oxobiodegradables es decir que en su fabricación se les agregó un aditivo para mejorar su descomposición en el ambiente. Estas muestras se sometieron a una degradación oxidativa mediante tres diferentes métodos (degradación térmica, exposición a luz UV y exposición al sol), luego se les realizó el estudio de biodegradabilidad. En esta sección se expondrán las metodologías utilizadas en todo el proyecto de investigación.

### **6.1 Metodología general de análisis DSC**

#### 6.1.1 Equipo y suplementos

- Crisoles de aluminio ventilados tamaño 40 microlitros
- Micro balanza analítica con precisión de 0.001 mg
- Muestras
- Pinzas para crisol
- Prensa
- Navaja o tijera para cortar los pellets
- Perforador para cortar las bolsas
- Gas nitrógeno como gas de purga inerte

#### 6.1.2 Procedimiento

- Preparación y colocación de la muestra.

Para el caso de los pellets se cortaron pedacitos pequeños con la ayuda de una navaja u otro objeto con filo que sea adecuado. Para el caso de las muestras si el material es más delgado



(como una hoja) se utilizó un perforador para poder colocarlo en la cápsula sin problema. En muchos casos las muestras con masa de 5mg son satisfactorias (ASTM International 2015). Se seleccionaron crisoles limpios y con el volumen apropiado, se perforaron las tapas de los crisoles con la aguja estándar que se encuentra en la caja de crisoles.

Se pesaron y anotaron las masas de los crisoles, luego se tararon para colocar las masas de las muestras sólidas. Se anotaron las masas de las muestras y se taró. Se debe colocar la muestra en el crisol y pesar junto con la tapa. Se sellaron procurando presionar lo suficiente para que no existan aberturas en el perímetro y se tenga que volver a pesar. Con ayuda de pinzas, se colocaron con cuidado los crisoles sellados en la cámara DSC. En el equipo se debe de tener el crisol de referencia (vacío o no) y el crisol con muestra (ISO International Organization for Standardization 2015).

Se acondicionó con un gas de purga igual al que se utilizó para la calibración, la velocidad del gas debe ser también la misma (ASTM International 2015). Se utilizó un caudal de 20 mL/min.

- Configuración del tratamiento térmico en software

Se calentó la muestra a una velocidad de 10° C/min desde 25°C hasta 200°C, para eliminar la historia térmica y se mantuvo dicha temperatura hasta al menos 5 min. Se enfrió a una velocidad de 10°C/min desde la temperatura anterior hasta 25°C y se mantuvo por 5 min (ASTM International 2015).

Se calentó nuevamente a una velocidad de 10°C/min como la primera vez y se utilizaron las mediciones de este calentamiento para calcular las entalpías de transición (ASTM International 2015). Por último, se enfrió hasta 25°C y se mantuvo durante 5 minutos para finalizar el proceso.

- Análisis de resultados

Se analizaron los datos obtenidos para el segundo calentamiento, se observó si existía más de un punto de fusión (más de un pico en el segundo calentamiento). Se identificaron los tipos de



polímeros que constituyen el material según los rangos de temperatura para su respectivo punto de fusión (utilizar referencias bibliográficas).

- Inspección post medición

Se inspeccionaron los crisoles y la cámara luego del experimento, se observó si el sello estaba bien, sin ninguna deformación y que la cámara estuviera impecable. Se pesaron las masas de los crisoles con muestra después de la prueba para corroborar que no hubo descomposición o evaporación. Para finalizar se abrieron los crisoles y se realizó una inspección visual para verificar que no hay cambios de color (ISO International Organization for Standardization 2015).

## **6.2 Metodología general para la determinación de contenido de humedad, cenizas, y material orgánico en suelos**

La metodología y cálculos utilizados son propuestos y adaptados de la norma ASTM D 2974-20: Standard Test Method for Determining the Water (Moisture) Content, Ash Content, and Organic Material of Peat and Other Organic Soils (ASTM International 2020). En específico se utilizó el Método A propuesto en la misma norma.

### 6.2.1 Equipos y materiales

- Horno regulable a una temperatura constante de  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- Mufla capaz de producir una temperatura constante de  $440 \pm 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $750 \pm 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Lámina de goma o material no absorbente.
- Cápsulas de porcelana de no menos de 100 mL de capacidad.
- Bandeja.
- Desecador.
- Pinzas para crisol.
- Espátulas.
- Balanza analítica.
- Recubrimiento de papel aluminio.



### 6.2.2 Preparación de la muestra

Se trabajó rápidamente y en ambientes con una humedad alta (>50%) para prevenir cambios en el contenido de agua. Se colocó una porción representativa de la muestra en una lámina de goma o material no absorbente y se mezcló bien. Se colocó la muestra de prueba en un contenedor impermeable, y se trabajó rápidamente para evitar la pérdida de humedad. Se utilizó un método de despiece y se produjo una muestra de al menos 300 g. Todo el suelo sin utilizar se selló correctamente en contenedores a prueba de agua.

Luego se redujo la muestra representativa a  $50.00 \pm 10$  g. Todo el suelo restante se selló correctamente en contenedores a prueba de agua.

### 6.2.3 Procedimiento

- a) Se registró la masa de las cápsulas de porcelana previamente secadas a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  donde se colocaron la muestra respectiva junto con el recubrimiento de papel aluminio, se hizo con una precisión de 0.01 g.
- b) Para cada muestra se colocaron los 50 g preparados con antelación en cada cápsula pesada anteriormente. Se tuvo cuidado de no crear bultos en la muestra, aplastándolos con cuchara o espátulas. El grosor de la muestra no excedió los 30 mm.
- c) Se cubrió inmediatamente con papel aluminio y se registró la masa.
- d) Se colocaron las cápsulas en el horno y se secaron por de 16 horas a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  o hasta que hubo un cambio de masa menor de 0.1% por hora.
- e) Se retiraron del horno y se cubrieron suavemente, luego se dejaron enfriar en un desecador. A continuación, se registró la masa de la muestra seca, manteniendo la exposición al ambiente de la habitación al mínimo.



- f) Se removió el recubrimiento y se colocaron las cápsulas en la mufla. Se llevó la temperatura gradualmente a  $440 \pm 40^\circ\text{C}$ . Se registró la temperatura de la mufla con una precisión de  $1^\circ\text{C}$ .
- g) Cuando la mufla alcanzó la temperatura establecida se dejaron las cápsulas por un periodo de 1 hora por lo menos (la muestra es considerada completamente cenizas cuando no hay un cambio de masa lo cual ocurre después de estar por lo menos 1 hora en el horno a esa temperatura.
- h) Se registró el tiempo total en la mufla aproximando a los 15 minutos más próximos.
- i) Después de que la muestra se transformó completamente a ceniza, se removieron las cápsulas de la mufla, se colocó suavemente el recubrimiento de aluminio y se colocaron en el desecador.
- j) Se dejaron enfriar a la temperatura del cuarto manteniendo la exposición al ambiente de la habitación al mínimo.
- k) Luego se registró la masa de las cápsulas con el contenido de cenizas y el recubrimiento, con una precisión de 0.01 g.

#### 6.2.4 Cálculos

Se calculó el contenido de humedad  $w$  como se muestra a continuación en la Ecuación 6.1. Esta humedad está referida como humedad en base seca:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 = \frac{(M_{cms} - M_{c ds})}{(M_{c ds} - M_c)} \times 100 \quad (\text{Ec.6.1})$$



Donde:

$w$  = contenido de agua, cerca de 1% para  $w < 100$  %; 5% para  $w$  100-500 %; 10% para  $w$  501-1000 %; 20% para  $w > 1000$  %.

$M_w$  = Masa de agua ( $M_w = M_{cms} - M_{cds}$ ), cercano a 0.01 g.

$M_s$  = Masa de la muestra secada en horno ( $M_s = M_{cds} - M_c$ ), cercano a 0.01 g.

$M_{cms}$  = Masa de la cápsula con recubrimiento más la muestra húmeda, cercano a 0.01 g.

$M_{cds}$  = Masa de la cápsula con recubrimiento más la muestra seca, cercano a 0.01 g.

$M_{cms}$  = Masa de la cápsula con recubrimiento cercano a 0.01 g.

Se calculó el contenido de cenizas  $A_c$  como se muestra en la Ec. 6.2 a continuación:

$$A_c = \frac{M_a}{M_s} \times 100 = \frac{(M_{cas} - M_c)}{(M_{cds} - M_c)} \times 100 \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Donde:

$A_c$  = contenido de cenizas, cerca del 0.1%

$M_a$  = Masa de la ceniza ( $M_a = M_{cas} - M_c$ ), cercano a 0.01 g.

$M_{cas}$  = Masa de la cápsula con recubrimiento más la muestra en cenizas, cercano a 0.01 g.

Se calculó el material orgánico  $O_m$  como se muestra a continuación:

$$O_m = 100 - A_c \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Donde:

$O_m$  = material orgánico, cerca del 0.1%

### 6.3 Metodología general para la determinación de pH en suelos

La metodología y cálculos utilizados son propuestos y adaptados de la norma ASTM D 2974-87: Standard Test Method for pH of Soils. En específico se utilizó el Método A propuesto en la misma norma. El pH del compostaje depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso (desde 4.5 a 8.5). La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6.0 - 7.5.





### 6.3.1 Equipos y materiales

- Balanza Analítica.
- Beaker 50 mL.
- Probeta.
- Potenciómetro.

### 6.3.2 Reactivos

- Cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) 0.01 M.
- Agua destilada.
- Soluciones buffer.

### 6.3.3 Procedimiento

- a) Se calibró el equipo de medición de pH con las soluciones buffer antes de realizar las mediciones. La calibración se hizo siguiendo las indicaciones del fabricante.
- b) Se preparó una muestra de suelo previamente secada y tamizada con un diámetro máximo de 2 mm.
- c) Se pesó aproximadamente 10 g de suelo. Se colocó en un beaker de 50 mL la muestra pesada y se agregó aproximadamente 10 mL de agua destilada.
- d) Se mezcló bien y se dejó reposar durante 1 hora.
- e) Se colocó el electrodo en la suspensión parcialmente asentada para mitigar el efecto de suspensión.
- f) Se leyó y se registró el valor de pH.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

- g) Se pesaron aproximadamente 10 g de suelo. Se colocó en un beaker de 50 mL la muestra pesada y se agregó aproximadamente 10 mL de la solución de Cloruro de calcio 0.01 M.
- h) Se mezcló bien y se dejó reposar durante 1 hora.
- i) Se leyó y se registró el valor de pH.
- j) Se realizaron las mediciones por triplicado

*Nota:* las mediciones deben realizarse a una temperatura entre 15 a 25 °C.

## **6.4 Metodología para determinación de contenido de nitrógeno**

### 6.4.1 Equipo

- Balanza analítica.
- Probeta 100 mL.
- Varilla de vidrio.
- Soporte universal.
- Pipeta de 10 mL.
- Pinza de sostén.
- Agitador magnético.
- Bureta de 50 mL.
- 4 Beaker de 100 mL.
- Matraz volumétrico de 100 mL.
- Matraz volumétrico de 250 mL.

### 6.4.2 Reactivos

- Solución de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ), patrón 1 N.
- Ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ).



- Solución indicadora de ferroína
- Sulfato de hierro (II) ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), patrón para titulación aproximadamente 0.5 N

#### 6.4.3 Preparación de soluciones

Las soluciones se prepararon de la siguiente manera:

- Sulfato de hierro (II) 0.5 N: Se disolvió alrededor de 34.75 g de sulfato de hierro (II), se añadieron 10 mL de ácido sulfúrico concentrado, se enfrió y se diluyó hasta 250 mL. Estandarizar la solución con patrón de dicromato de potasio.
- Dicromato de potasio 1 N: Se disolvieron 2.2515 g de dicromato de potasio para una solución de 50 mL.

Para obtener la concentración real de dicromato de potasio se utilizó la fórmula presentada en la Ec. 6.4 :

$$\text{Normalidad real } K_2Cr_2O_7 = \frac{\text{g pesados de } K_2Cr_2O_7 \cdot 6 \text{ meq}}{\text{mL preparados (50mL)} * 294.185 \text{ g/mol}} \quad (\text{Ec. 6.4})$$

- Solución indicadora de ferroína: Se disolvió 1.485 g de 1,10-fenantrolina monohidratado y 695 mg de sulfato de hierro en agua destilada y se aforó a 100 mL.

Se calculó la concentración real del sulfato de hierro (II) con la Ec. 6.5:

$$\text{Normalidad } FeSO_4 = \frac{10 \text{ mL de } K_2Cr_2O_7 * \text{Concentración real de } K_2Cr_2O_7}{\text{Volumen en mL de } FeSO_4 \text{ utilizado en la titulación}} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

#### 6.4.4 Procedimiento



- a) Se lavaron los tubos con ácido sulfúrico al 20% antes de usarlos por primera vez para evitar contaminación.
- b) Se colocó 0.1 g de muestra en un beaker y se añadieron 10mL de la solución de dicromato.
- c) Se vertió con cuidado 20 mL de ácido sulfúrico concentrado en el beaker y se enfrió por 30 min.
- d) Se añadieron 1 a 2 gotas de indicador ferroína al beaker, agitar rápidamente con un agitador magnético mientras se tituló con sulfato de hierro (II) 0.5 N. El punto final es un marcado cambio de color del naranja-amarillo al verde azulado, como se observa en la Figura 6.1. De la misma forma se realizó un blanco (que contenga los reactivos, pero no la muestra) y se tituló.



Figura 6.1 Punto final de la titulación (Fuente: Elaboración propia).

#### 6.4.5 Cálculos

Se obtuvo el porcentaje de carbono en las muestras utilizando la Ecuación 6.6:

$$\%C = [FeSO_4] * (Vb - Vm) * \frac{12}{4000} * \frac{1}{z} * \frac{100}{m} \quad (\text{Ec. 6.6})$$



Donde:

V<sub>b</sub> = Volumen gastado en blanco.

V<sub>m</sub> = Volumen gastado en muestra.

z = Factor de recuperación de Walkley (z=0.77)

m = Masa muestra.

Luego se obtuvo el porcentaje de materia orgánica con la Ecuación 6.7:

$$\%MO = \%C * 1.72 \quad (\text{Ec. 6.7})$$

Por último, se calculó el porcentaje de nitrógeno del suelo utilizando la Ecuación 6.8:

$$\%N = \%MO * 0.05 \quad (\text{Ec. 6.8})$$

*Nota:* Es importante utilizar mascarilla y proteger las manos del calor producido cuando se mezcla la solución de dicromato con el ácido sulfúrico concentrado.

## **6.5 Metodología general para la degradación oxidativa o fragmentación de materiales plásticos.**

Según la norma ASTM D6954-18: Standard Guide for Exposing and Testing Plastics that Degrade in the Environment by a Combination of Oxidation and Biodegradation, el proceso de degradación de plásticos se compone de tres fases. La primera de ellas es la degradación oxidativa que a su vez puede producirse por oxidación térmica o por oxidación ultravioleta. La segunda fase es la degradación biológica que se retomará en el siguiente punto y por último la fase de toxicología que no entra dentro de los alcances de esta investigación. Un esquema de esta metodología puede observarse en la figura 6.2



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

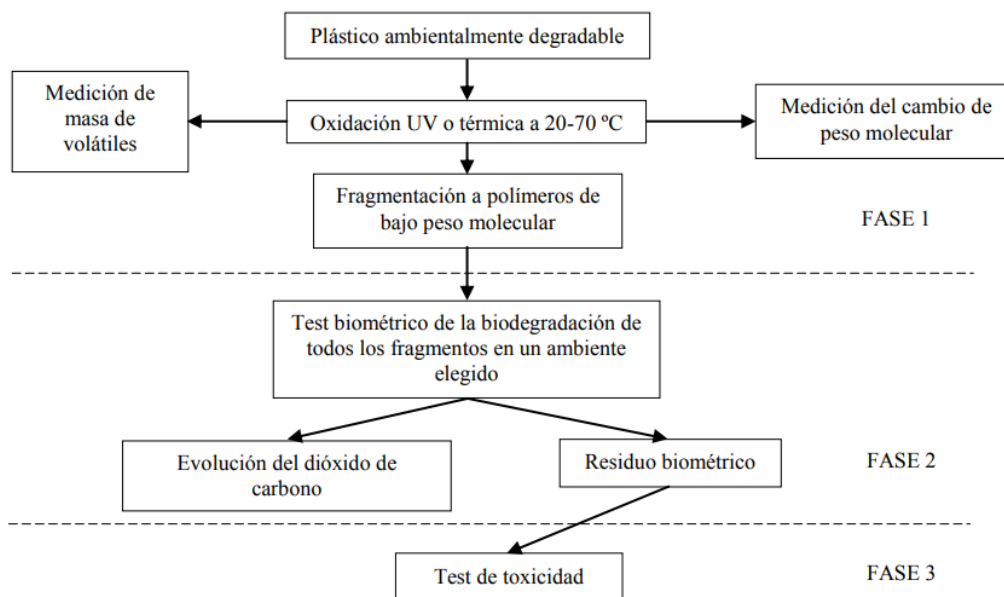


Figura 6.2 Esquema de la metodología para la degradación oxidativa (Fuente: Elaboración propia).

Para la primera fase, la metodología y cálculos utilizados son propuestos y adaptados de las Normas ASTM D5208-14: Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Exposure of Photodegradable Plastics; ASTM D5510-94: Standard Practice for Heat Aging of Oxidatively Degradable Plastics, ASTM D6954-18: Standard Guide for Exposing and Testing Plastics that Degrade in the Environment by a Combination of Oxidation and Biodegradation y ASTM D3826-18: Standard Practice for Determining Degradation End Point in Degradable Polyethylene and Polypropylene Using a Tensile Test.

### 6.5.1 Equipos y suplementos

- Oxidación térmica.
  - 3 hornos.
  - 3 rejillas para sujetar probetas.
  - 3 termómetros.



- Oxidación ultravioleta.
  - Soporte para probetas.
  - Cámara UV.
  - 2 lámparas UV.
- Medidor de tensión de plástico Instrón modelo 3340 Single Column Table Frames.
- Cortador de probetas plásticas.

#### 6.5.2 Procedimiento

##### Preparación de muestras de análisis.

- a) Las muestras plásticas a las cuales se les hará un análisis completo de la fase 1 se cortaron con dimensiones de 1 pulgada de ancho por 6 pulgadas de largo según metodología. Luego se colocaron en sus respectivas zonas de degradación oxidativa junto con las muestras sin cortar.

##### Oxidación térmica.

- a) Dentro de los hornos se colocaron las muestras de tal forma que reciban calor constante de todas las direcciones por lo que no pueden ser depositadas únicamente. La temperatura de los hornos se estableció de forma diferente para cada uno siendo los valores: 35, 45 y 55 °C. Los valores se escogieron tomando en cuenta la normativa correspondiente.
- b) El tiempo dentro de los hornos se estableció de acuerdo a la norma ASTM D5510-94 tabla 1. Para este caso el tiempo establecido fue de 2 meses.

##### Oxidación ultravioleta.

- a) Una parte de las muestras destinadas a oxidación UV fue puesta dentro de la cámara UV con dos lámparas con longitud de onda cercana a 340 nm. El tiempo de experimento se estableció en 10 días, equivalente a 240 horas.



- b) La otra parte de las muestras fue puesta a exposición directa con la luz solar. El tiempo se estableció buscando obtener el mismo periodo que con la cámara UV. Tomando en cuenta el tiempo de exposición solar en un día, aproximadamente 10 horas, se dejaron las muestras por un período de 25 días.

### Pruebas de tensión

- a) Las probetas sometidas a oxidación se llevaron a una prueba de tensión en donde se buscó que el porcentaje de elongación fuera menor al 5%.

Las muestras resultantes son llevadas directamente a la siguiente fase independientemente de si existe un cambio en el peso molecular de la cadena polimérica o si hay un cambio en la masa de los volátiles.

## **6.6 Metodología general para determinación de biodegradabilidad de materiales plásticos.**

La metodología y cálculos utilizados son propuestos y adaptados de las Normas ASTM D5988-18: Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil y ASTM D7991-15: Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastics Buried in Sandy Marine Sediment under Controlled Laboratory Conditions.

### 6.6.1 Equipos y suplementos

- Aparato Incubador por contacto con suelo (desecadores de 2 a 4 L):
  - 2 recipientes solo para el suelo (blanco).
  - 2 recipientes para control técnico (solo con la solución absorbente).
  - 2 recipientes para un material de referencia positivo.
  - 3 recipientes por cada material de prueba.
- Beaker 150 mL por cada muestra.
- Beaker 100 mL por cada muestra.





- Beaker de 1 L.
- Beaker de 2 L.
- Cuarto oscuro con control de temperatura entre 20 y 28°C.
- Balanza analítica.
- 2 Balón volumétrico de 1 L.
- Bureta de 100 mL.
- Soporte universal.
- Pinzas de sostén.
- Probeta de 100 mL.
- Potenciómetro.
- Agitador de vidrio.
- Agitador Magnético.
- Termohigrómetro.

Cada aparato incubador por contacto con suelo, se montó en desecadores de vidrio y consta de cada uno de los componentes, como se muestran en la figura 6.3:

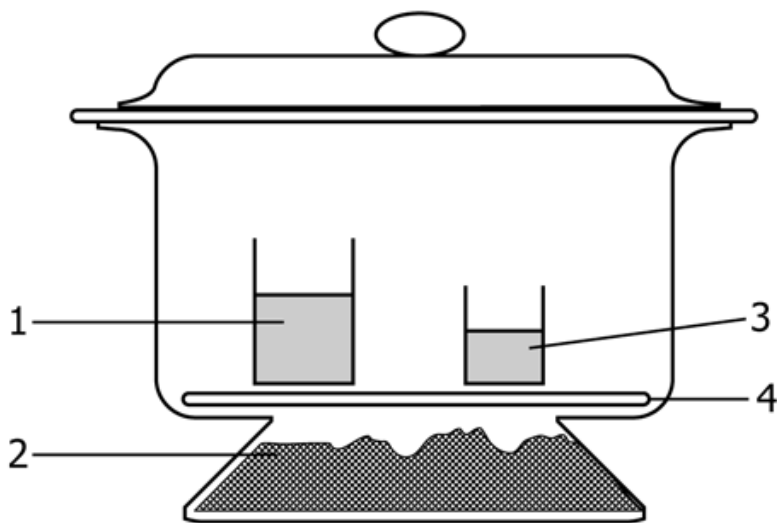


Figura 6.3 Esquema del aparato incubador por contacto con suelo. 1: Solución de hidróxido de bario, 2: suelo, 3: beaker con agua destilada, 4: plato del desecador. Fuente: ASTM 5988-18 (ASTM International 2018a)



### 6.6.2 Reactivos

- Solución de fosfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ), 4.72 g/L.
- Solución de hidróxido de bario ( $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ), 0.025 N.
- Solución de ácido clorhídrico (HCl), 0.05 N.
- Solución de biftalato de potasio ( $\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$ ) 0.05 N
- Fenolftaleína

### 6.6.3 Procedimiento

#### *Preparación de Soluciones*

- b) Solución de fosfato de amonio, 4.72 g/L: En un beaker de 1 L se disolvió 4.72 g de fosfato de amonio con agua destilada. Esta solución se agregó al suelo para regular la relación carbono/nitrógeno (C/N).
- c) Solución de hidróxido de bario (0.025 N): En un beaker de 2L se agregaron aproximadamente 1.5 L de agua destilada y se colocaron en equipo de ultrasonido durante 30 min para eliminar el contenido de dióxido de carbono en el agua. Se pesaron aproximadamente 4 gramos de hidróxido de bario anhidro y se disolvió en balón de 1 L con agua sin dióxido de carbono (enfriar agua para mejorar la solubilidad del hidróxido). Esta solución debe realizarse el mismo día que se utilizará en la prueba y mantener sellada. Se estandarizó cada vez que se preparó con solución de biftalato de potasio al 0.05 N. Se recomienda preparar de 5 a 20 L de esta solución cuando se prepara una serie de pruebas. En la preparación del hidróxido de bario se requiere atención para evitar la formación de carbonato de bario que puede llegar a inhibir la difusión del dióxido de carbono en el medio absorbente. En caso de no poder utilizar el hidróxido de bario se puede sustituir con una solución de hidróxido de potasio (0.5 N) disolviendo 28 g en un litro de agua destilada.



- d) Solución de ácido clorhídrico (0.05 N): En balón de 1 L se agregaron 1.6 mL de ácido clorhídrico concentrado en 1 L de agua destilada.

#### *Preparación del suelo y muestras*

- a) Se tamizó el suelo hasta un tamaño de partícula de 2 mm o menor. Se retiraron además cualquier partícula de planta, rocas u otros materiales inertes. Se almacenó en un recipiente sellado a  $4 \pm 1$  °C por máximo de un mes.
- b) Seleccionar material de prueba, se procedió a cortar en trozos asegurándose que tengan un tamaño parejo, de igual forma se cortó el material de control positivo, que en este caso fue papel (celulosa).

#### *Prueba de Biodegradabilidad*

La prueba se realizó por duplicado para los materiales de prueba (cuatro materiales biodegradables o biocompostables), duplicado para control positivo, duplicado para el blanco y duplicado por control técnico.

- a) Se colocaron entre 100 a 500 g de suelo en el fondo del recipiente.
- b) Se modificó el nitrógeno del suelo para dar una C/N entre 10:1 y 20:1 (en peso) con respecto al carbono de la muestra de prueba. Para lograrlo se agregó el volumen apropiado de una solución de fosfato de amonio, se realizaron cálculos para conocer la cantidad a agregar en cada desecador y se agregó la misma cantidad de nitrógeno a los blancos y materiales de referencia.
- c) Se agregó agua destilada para llevar la humedad entre un 80 o un 100% de la capacidad de retención de humedad.



- d) Se pesó el recipiente tapado y con el suelo ya preparado (nitrógeno y humedad). Se anotó el peso.
- e) Se agregaron las muestras o el material de prueba (aproximadamente 200 mg a 1000 mg por 500 g de suelo) y se mezcló bien con el suelo.
- f) Se colocaron 100 mL de hidróxido de bario (0.025 N) en un beaker de 150 mL y 50 mL de agua destilada en un beaker de 100 mL sobre la placa perforada dentro del desecador.
- g) Se selló el recipiente y se colocó en cuarto oscuro a una temperatura entre 20 y 28 °C, manteniendo la temperatura a  $\pm 2$  °C.

### *Titulación*

El dióxido de carbono producido en cada recipiente reacciona con el hidróxido de bario y es precipitado como carbonato de bario. La cantidad producida es determinada titulando la solución restante de hidróxido de bario.

Debido a la incubación estática el carbonato de bario se forma en la superficie de la solución y debe ser evitado moviendo gentilmente el recipiente para asegurar la absorción continua.

Las trampas de hidróxido de bario deben retirarse y titularse antes de que se exceda su capacidad. La frecuencia recomendada es cada 3 o 4 días por las primeras 2 o 3 semanas y luego cada semana o cada tres semanas.

Para el material de control positivo se recomienda titular todos los días debido a la posible mayor producción de dióxido de carbono por la naturaleza de la muestra.

- a) Se abrió el sistema de biodegradabilidad y se extrajo el beaker con solución de hidróxido de bario y el beaker con agua.

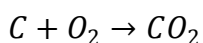


- b) Se pesó el recipiente sin las trampas para ver la pérdida de humedad.
- c)
- d) Se midió el pH al beaker con solución de hidróxido de bario y al beaker con agua.
- e) Al beaker con hidróxido de bario se agregaron gotas de fenolftaleína.
- f) Se tituló con solución de ácido clorhídrico al 0.05 N hasta punto final de viraje de color.
- g) Se registraron volúmenes gastado de ácido clorhídrico.
- h) Se dejaron abiertos durante un mínimo de 15 minutos y máximo de 1 hora para renovar el aire en el recipiente y luego se colocaron los beakers con soluciones nuevas de hidróxido de bario (0.025 N) y agua destilada sobre la placa perforada dentro del desecador. Se midió el pH inicial de estas soluciones y del agua.
- i) Se agregó agua destilada al suelo correspondiente a la diferencia de peso y se tapó el recipiente y se colocó de nuevo en un lugar oscuro hasta la próxima titulación.

#### 6.6.4 Cálculos

El fin de la norma ASTM D5988-18 es cuantificar la formación de dióxido de carbono a lo largo del tiempo de la prueba. Se determinó, por cálculo la cantidad de carbono orgánico total de la muestra. Esto permite el cálculo de la cantidad teórica de la evolución del dióxido de carbono:

$$\text{material} = w\% \text{ carbono}; \frac{w}{100} \times \text{mg de material cargado} = Y \text{ mg de carbono cargado al contenedor}$$



12 g C producen 44 de CO<sub>2</sub>

$$Y \text{ mg de C producen } \frac{44 \times Y}{12} \text{ mg CO}_2$$



### *Cantidad neta de dióxido de carbono producido*

Se obtuvo la cantidad correcta de ácido clorhídrico realizando la resta con la cantidad obtenida en la titulación del blanco:

$$Z_n = Z_b - Z_t$$

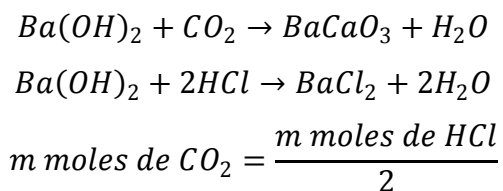
Donde:

$Z_n$  = mililitros calculados de ácido clorhídrico necesarios para titular el dióxido de carbono generado solamente por el material de prueba.

$Z_b$  = mililitros de ácido clorhídrico usados para titular el blanco con solo suelo.

$Z_t$  = mililitros de ácido clorhídrico usados para titular los contenedores con suelo y material de prueba.

Entonces:



Corrigiendo por normalidad del ácido clorhídrico:

$$\begin{aligned} m \text{ moles de CO}_2 &= \frac{(0.05 \text{ N}) \times \text{mL HCl}}{2} \\ \text{mg de CO}_2 &= \frac{(0.05 \text{ N}) \times \text{mL HCl} \times 44}{2} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 6.9})$$

Por eso, el dióxido de carbono convertido en mg es obtenido multiplicando la titulación de ácido clorhídrico por 1.1.

El porcentaje de dióxido de carbono convertido (Biodegradabilidad) es calculado como se muestra a continuación:

$$\% \text{Biodegradabilidad} = \frac{\text{mg de CO}_2 \text{ producido}}{\text{mg de CO}_2 \text{ teórico}} \times 100 \quad (\text{Ec. 6.10})$$



*Notas:*

- La norma ASTM D5988-18 indica el uso de fosfato de amonio para corregir la relación C/N de la muestra de suelo, pero el uso de sulfato de amonio 50% m/v puede ser una opción de no tener disponibilidad de fosfato de amonio.
- En la preparación del hidróxido de bario se requiere atención para evitar la formación de carbonato de bario que puede llegar a inhibir la difusión del dióxido de carbono en el medio absorbente.
- En caso de no poder utilizar el hidróxido de bario se puede sustituir con una solución de hidróxido de potasio (0.5 n) disolviendo 28 g en un litro de agua destilada.
- En caso de utilizar hidróxido de potasio la concentración del ácido clorhídrico debe ser de 0.25 N.
- Se recomienda evitar utilizar suelos contaminados que puedan afectar la actividad microbiana.
- Al momento de registrar el peso del recipiente, asegurarse de que tenga además la suficiente grasa de sello de aire.
- Si se llegará a ocupar una solución de hidróxido de potasio al 0.5 N en lugar del hidróxido de bario, se deberá colocar 20 mL en un beaker de 100 mL y los mismos 50 mL de agua en otro beaker de 100 mL
- Debido a la incubación estática el carbonato de bario se forma en la superficie de la solución y debe ser evitado moviendo gentilmente el recipiente para asegurar la absorción continua.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

- Las trampas de hidróxido de bario deben retirarse y titularse antes de que se exceda su capacidad. La frecuencia recomendada es cada 3 o 4 días por las primeras 2 o 3 semanas y luego cada semana o cada tres semanas.
- Para el material de control positivo se recomienda titular todos los días debido a la posible mayor producción de dióxido de carbono por la naturaleza de la muestra.





## 7 RESULTADOS

El proyecto se desarrollo en 2 fases:

- En la primera fase que se desarrollo de enero 2021 a enero 2022, se tomaron 5 muestras de resinas y 8 muestras de films elaborados con resinas biobasadas o con resinas tradicionales aditivadas y se realizaron el análisis térmico de cada una. Finalmente se seleccionaron 7 muestras de film y se sometieron a una prueba de biodegradabilidad sin tratamiento previo.
- En la segunda fase 2 que se desarrolló de febrero 2022 a noviembre 2022, se trabajó con 2 muestras de bolsas plásticas de la fase 1, las cuales tenían etiquetas de oxobiodegradables, es decir que en su fabricación se les adicionó un aditivo para acelerar su degradación. Estas muestras fueron seleccionadas por tener cada una un aditivo diferente. Las muestras fueron sometidas primero a una etapa de oxidación (degradación térmica, exposición a luz UV o exposición al sol) y luego a una prueba de biodegradabilidad. Se realizó estos dos procesos con el objetivo de investigar si la etapa previa de oxidación aceleraba la biodegradabilidad de las muestras en el período del experimento.

Para el experimento de biodegradación, en ambas fases, se tomó como control positivo papel periódico sin impresión.

### Primera fase

En esta primera fase a las muestras únicamente se les realizó el análisis de DSC y el análisis de biodegradabilidad .Las 7 muestras utilizadas en esta fase y los controles positivos, se detallan en la tabla 7.1

Tabla 7.1 Descripción de las muestras de la primera etapa

# de muestra	Descripción
Muestra 1	Bolsa blanca con aditivo oxium
Muestra 2	Bolsa blanca con aditivo ECM
Muestra 3	Bolsa blanca 100% biodegradable



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

Muestra 4	Bolsa verde con aditivo oxium
Muestra 5	Bolsa roja con aditivo oxium
Muestra 6	Bolsa gris de celofán
Muestra 7	Bolsa negra con aditivo ECM
Muestra 8 *	Bolsa blanca con aditivo P-life
Control Positivo 1	Papel periódico sin impresión
Control Positivo 2	Papel periódico sin impresión

\* A esta muestra solo se le realizó el análisis de DSC. Fuente: Elaboración propia

### Segunda fase

En esta segunda fase a las muestras se les realizó el tratamiento de degradación oxidativa y el análisis de biodegradabilidad.

Las 7 muestras utilizadas en esta fase y los controles positivos, se detallan en la tabla 7.2

Tabla 7.2 Descripción de las muestras de la segunda etapa.

# de muestra	Descripción	Pretratamiento
Muestra 8	Polietileno + Oxium <sup>1</sup>	-
Muestra 9	Polietileno + Oxium <sup>1</sup>	Horno
Muestra 10	Polietileno + P-life <sup>2</sup>	Horno
Muestra 11	Polietileno + Oxium <sup>1</sup>	Horno-Sol
Muestra 12	Polietileno + P-life <sup>2</sup>	Horno-Sol
Muestra 13	Polietileno + Oxium <sup>1</sup>	Horno-UV
Muestra 14	Polietileno + P-life <sup>2</sup>	Horno-UV
Control Positivo 1	Papel periódico sin impresión	-
Control Positivo 2	Papel periódico sin impresión	-

<sup>1</sup>: Correspondiente a la muestra 4 de fase 1.

<sup>2</sup>: Correspondiente a la muestra 8 de fase 1.

Condiciones: Horno: 45°C. Sol: 10 horas de luz solar (aproximadamente). UV: 340 nm. Fuente: Elaboración propia.



En la figura 7.1 se puede observar el esquema de experimentación que se realizó para cada una de las muestras del proyecto.

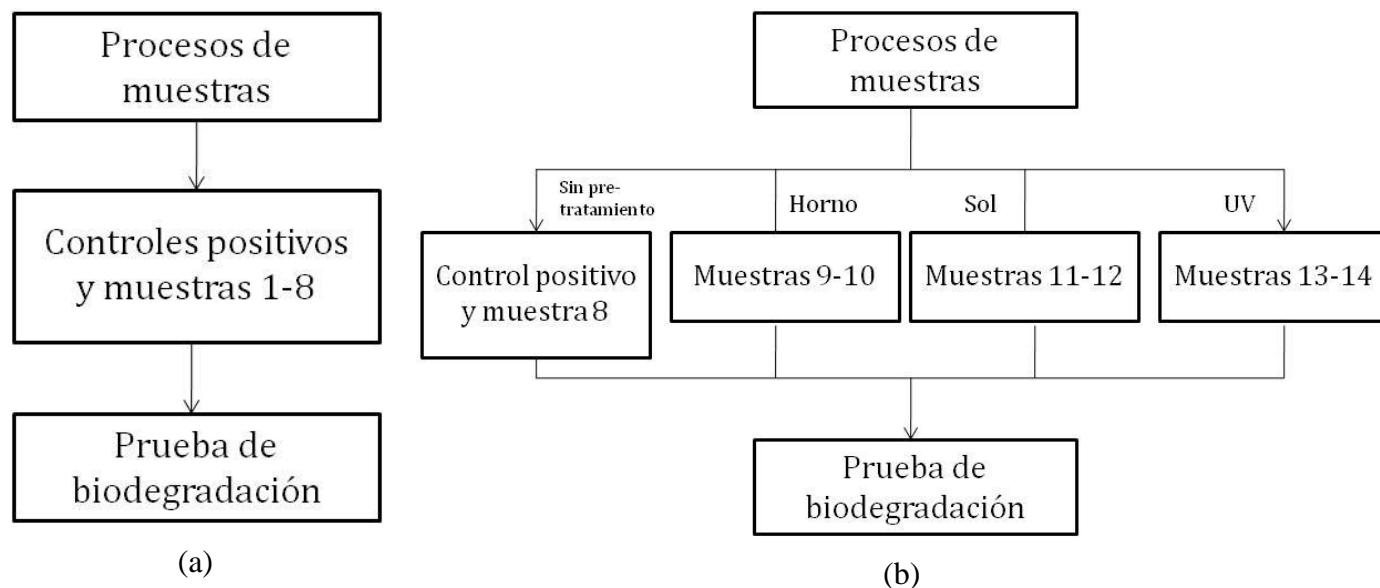


Fig.7.1. Esquema del proceso metodológico. (a) Proceso de muestras de fase 1. (b) Proceso de muestras de fase 2. (Fuente: Elaboración propia).

Se analizaron 5 resinas con sus respectivos productos plásticos que se encuentran en el mercado. Las resinas utilizadas se nombraron de la siguiente forma: Oxium, Biologic, ECM y PBS. Para el análisis térmico se analizaron las curvas calorimétricas tanto de la propia resina como de sus respectivos productos haciendo énfasis en los picos de fusión y cristalización. El análisis de degradación oxidativa se realizó para las muestras 8 a la 14 donde se obtuvo el porcentaje de elongación después de cada prueba. En cuanto al análisis de biodegradabilidad se realizaron las pruebas para todas las muestras. Las resinas y muestras de cada una pueden observarse en la figura 7.2, 7.3 y 7.4.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

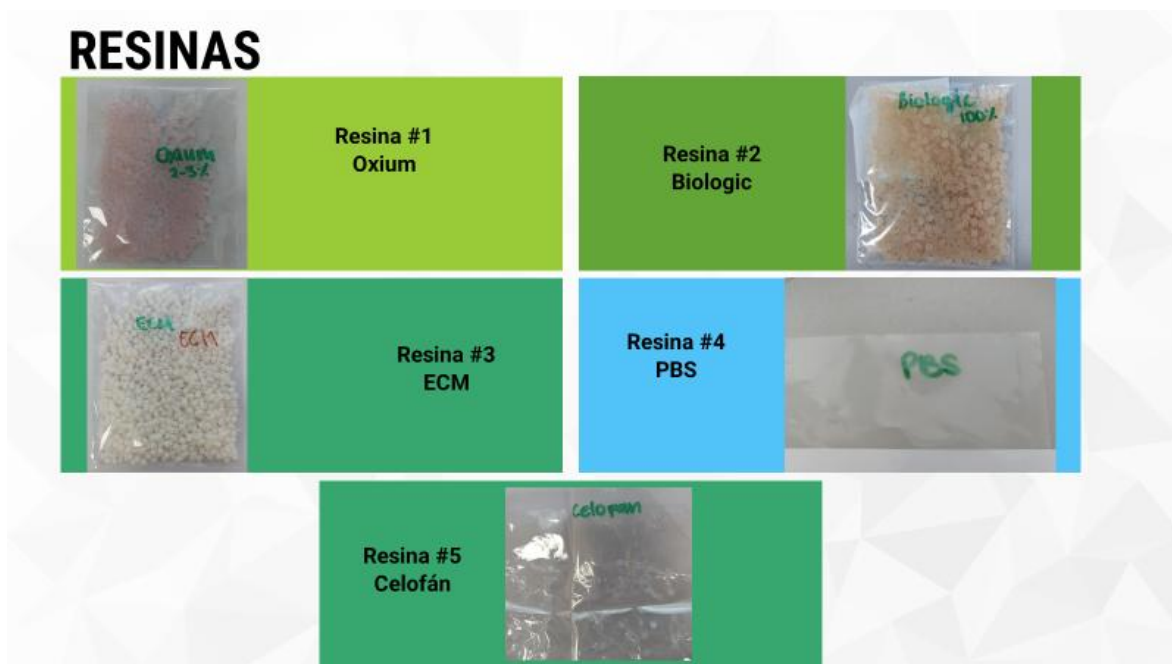


Fig.7.2. Resinas utilizadas para el análisis (Fuente: Elaboración propia).



Fig.7.3. Muestras utilizadas para el análisis (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

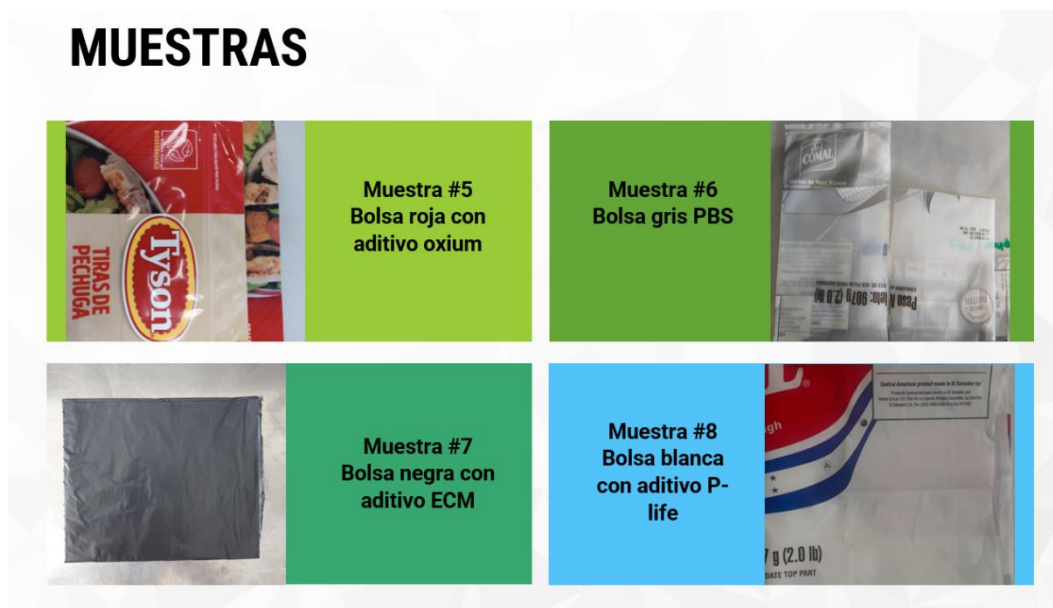


Fig.7.4. Muestras utilizadas para el análisis (Fuente: Elaboración propia).

## 7.1 Resultados fase 1

A continuación se detallan los resultados de DSC y de biodegradabilidad realizados a las muestras de la fase 1.

### 7.1.1 Resultados DSC

#### 7.1.1.1 Oxium

- Oxium Resina

En las figuras 7.5, 7.6 y 7.7 se observan los resultados obtenidos para el análisis de la resina oxium. Además, en la tabla 7.3 se pueden observar las características del análisis realizado.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

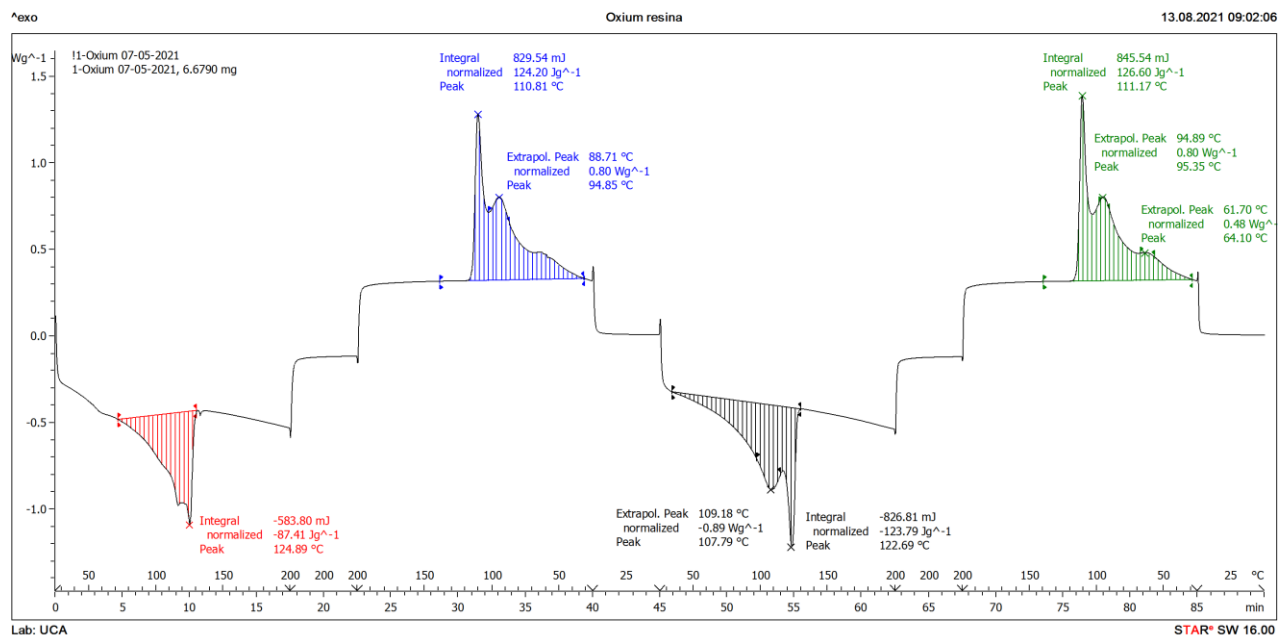


Fig.7.5 Análisis del DSC del programa completo de temperatura (Fuente: Elaboración propia).

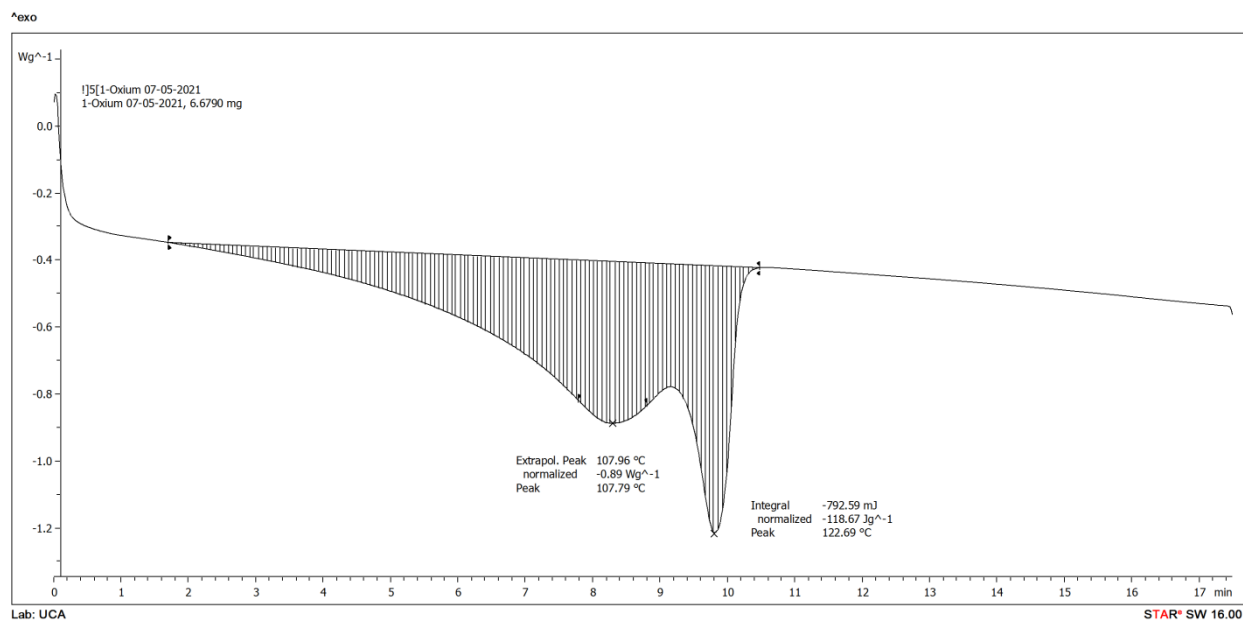


Fig.7.6 Análisis del DSC de la segunda fusión para la resina (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

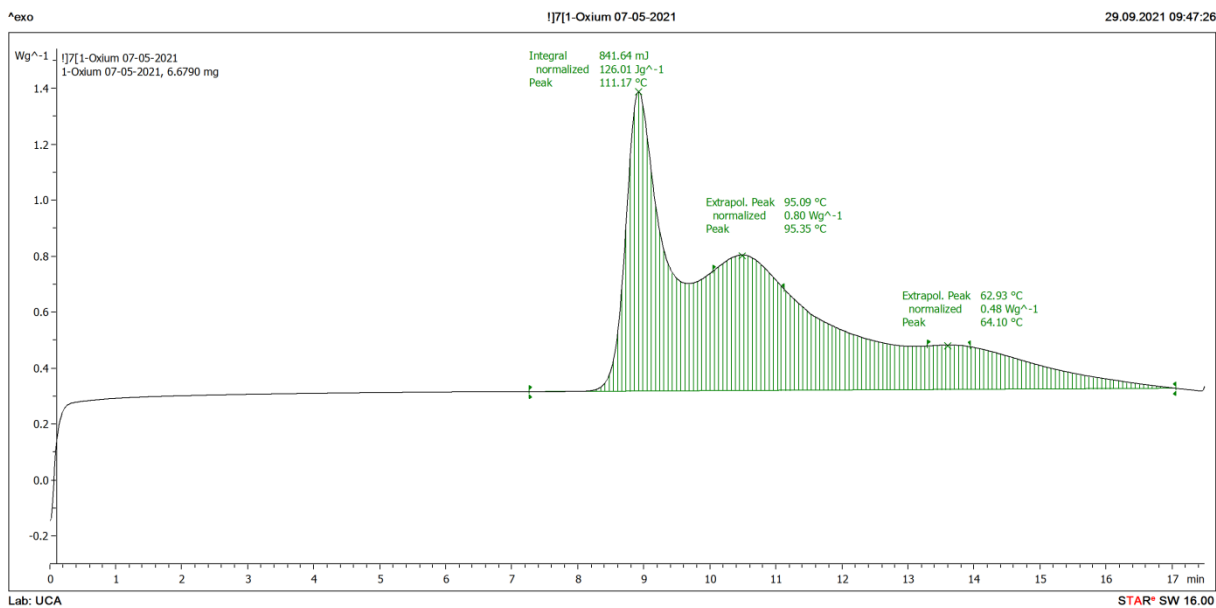


Fig.7.7 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la resina (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.3. Resultados del análisis de la resina Oxium.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	107.79	111.17	126.01	- Polietileno de baja densidad LDPE
2	122.09	95.35		- Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
<b>Peso inicial (mg)</b>	49.362	<b>Peso final (mg)</b>	49.353	

Fuente: Elaboración propia.

- Muestra 1

En las figuras 7.8, 7.9 y 7.10 se observan los resultados obtenidos para el análisis de muestra 1 correspondiente a la bolsa blanca con aditivo oxium. Además, en la tabla 7.4 se pueden observar las características del análisis realizado.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

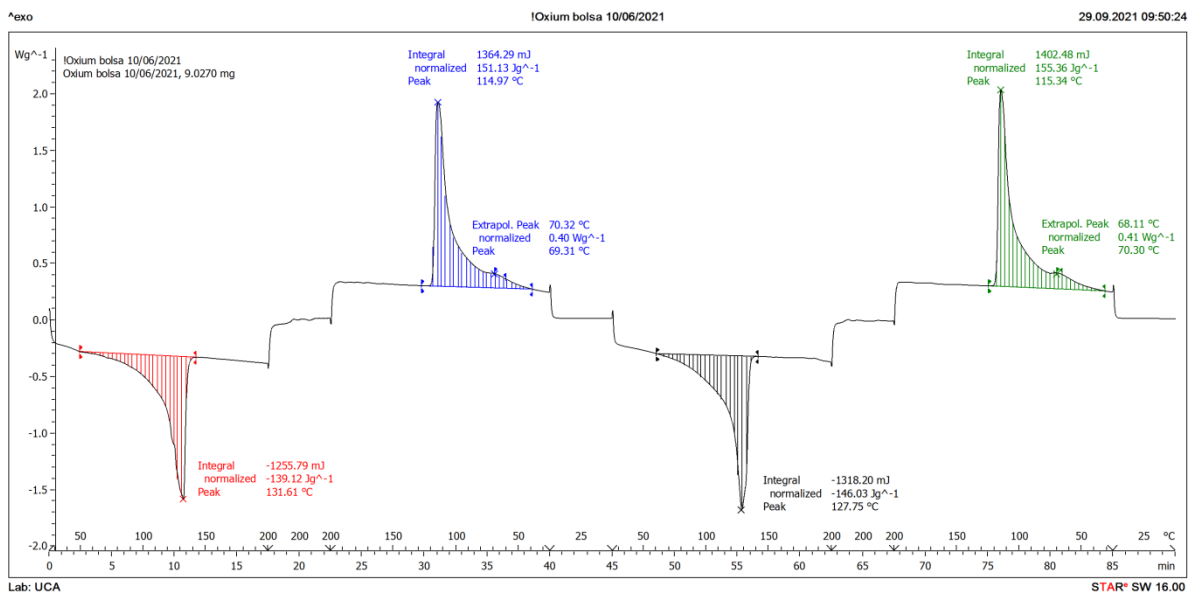


Fig.7.8 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la muestra 1 (Fuente: Elaboración propia).

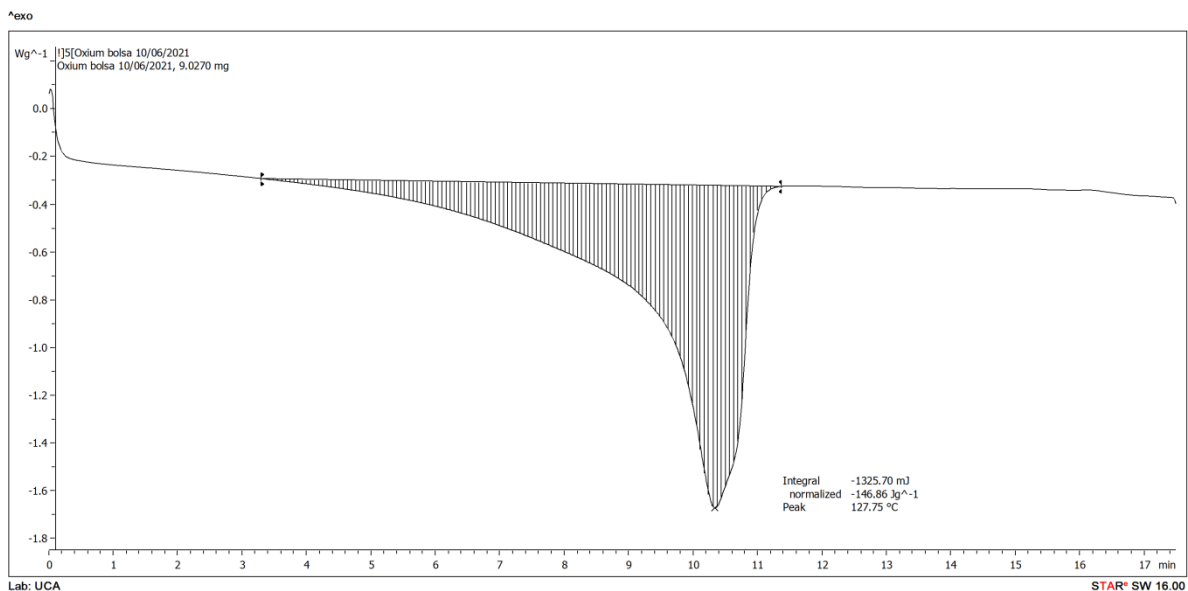


Fig.7.9 Análisis del DSC de la segunda fusión para la muestra 1 (Fuente: Elaboración propia).





“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

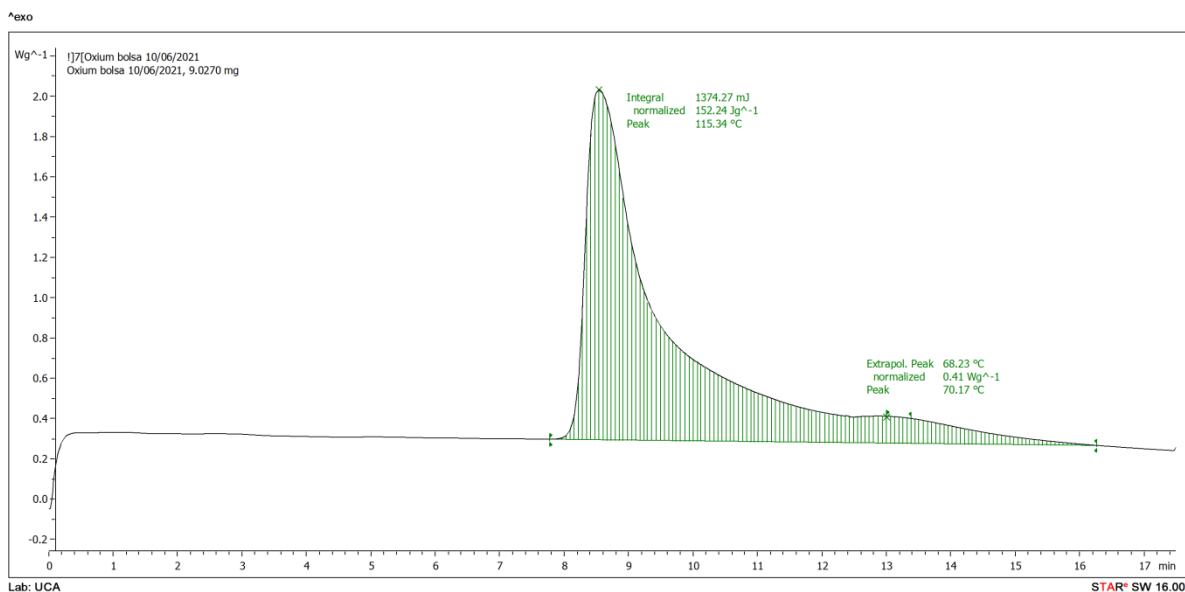


Fig.7.10 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la muestra 1 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.4. Resultados del análisis de la muestra 1.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	127.75	115.34	146.86	Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
2	-	70.17		
Peso inicial (mg)	50.985	Peso final (mg)	50.985	

Fuente: Elaboración propia.

- Muestra 4

En las figuras 7.11, 7.12 y 7.13 se observan los resultados obtenidos para el análisis de muestra 4 correspondiente a la bolsa verde con aditivo oxium. Además, en la tabla 7.5 se pueden observar las características del análisis realizado.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

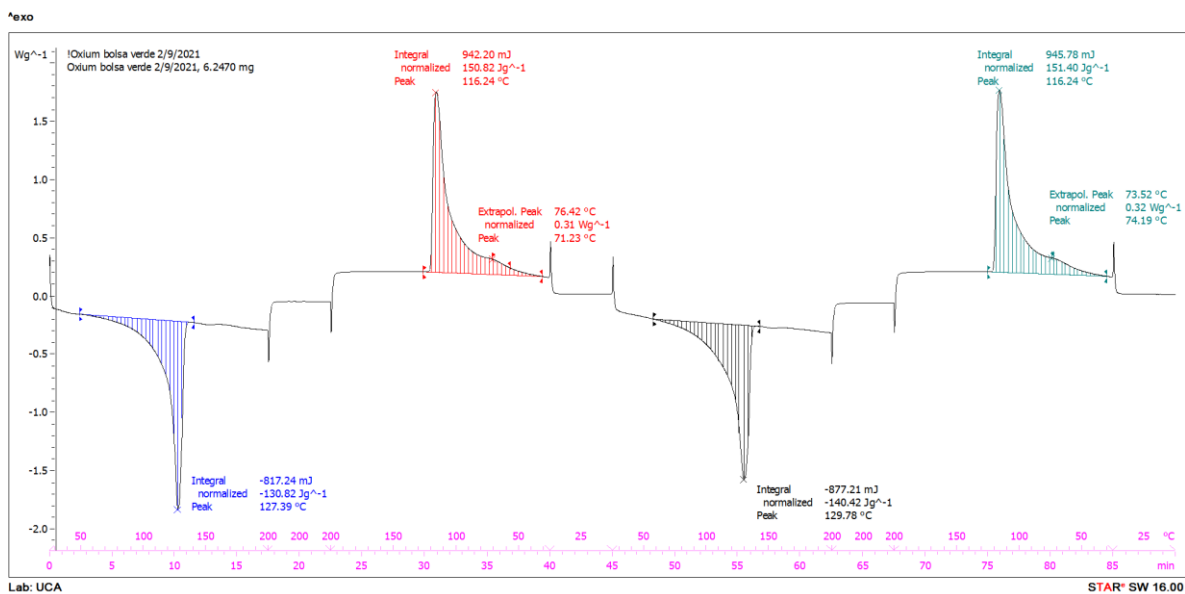


Fig.7.11 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la muestra 4 (Fuente: Elaboración propia).

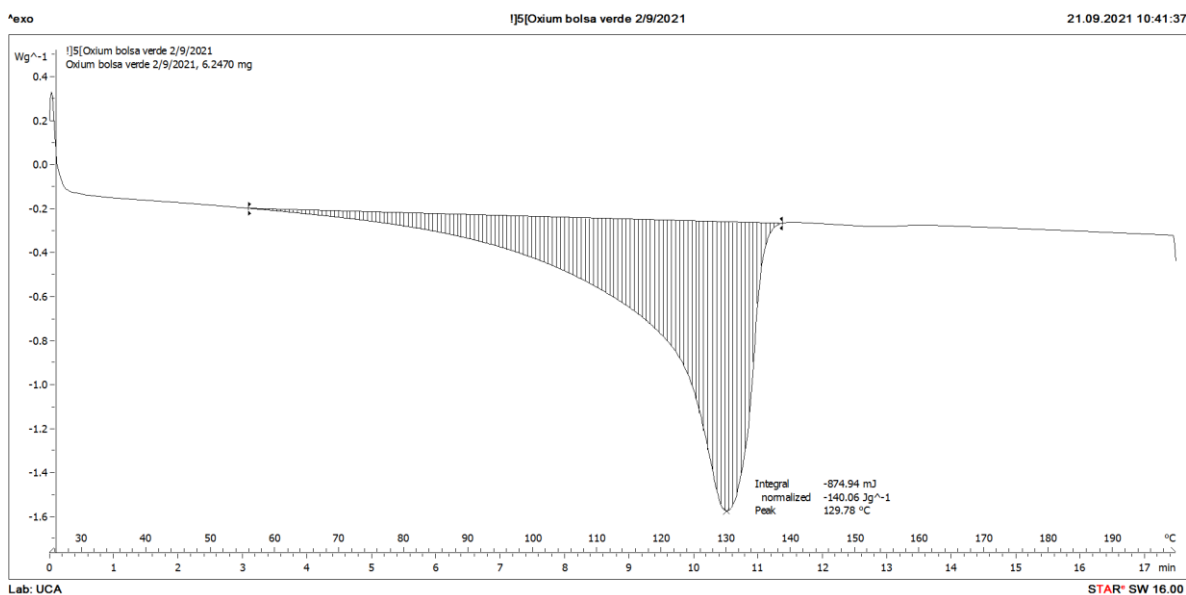


Fig.7.12 Análisis del DSC de la segunda fusión para la muestra 4 (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

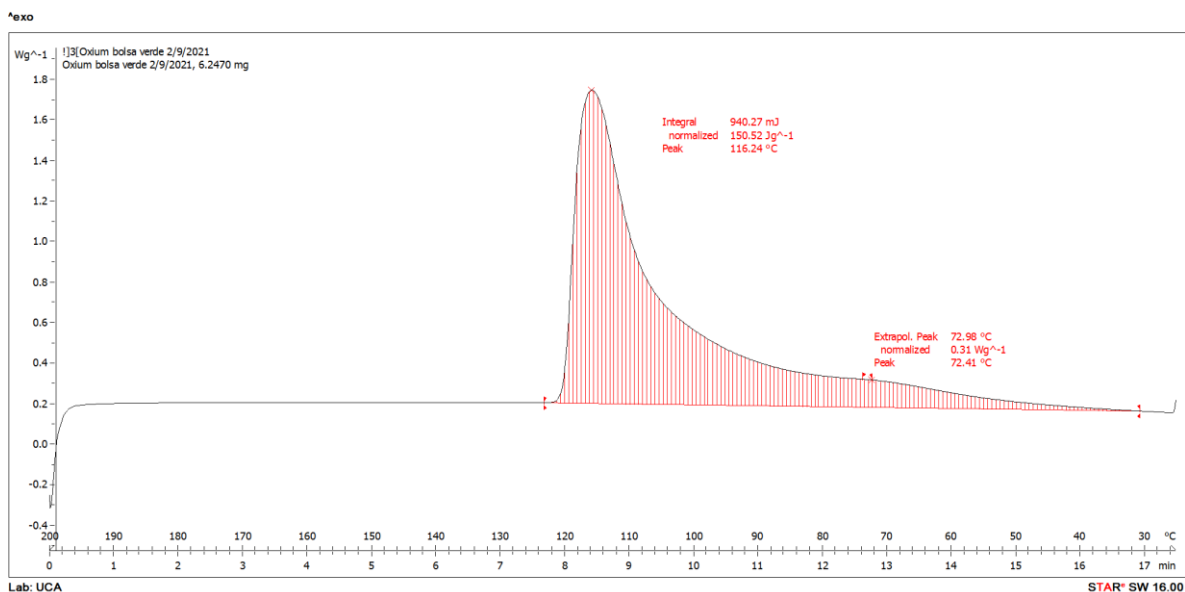


Fig.7.13 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la muestra 4 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.5. Resultados del análisis de la muestra 4.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	129.78	116.24	140.06	Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
2	-	72.41		
<b>Peso inicial (mg)</b>	49.362	<b>Peso final (mg)</b>	49.353	

Fuente: Elaboración propia.

- Muestra 5

En las figuras 7.14, 7.15 y 7.16 se observan los resultados obtenidos para el análisis de muestra 5 correspondiente a la bolsa roja con aditivo oxium. Además, en la tabla 7.6 se pueden observar las características del análisis realizado.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

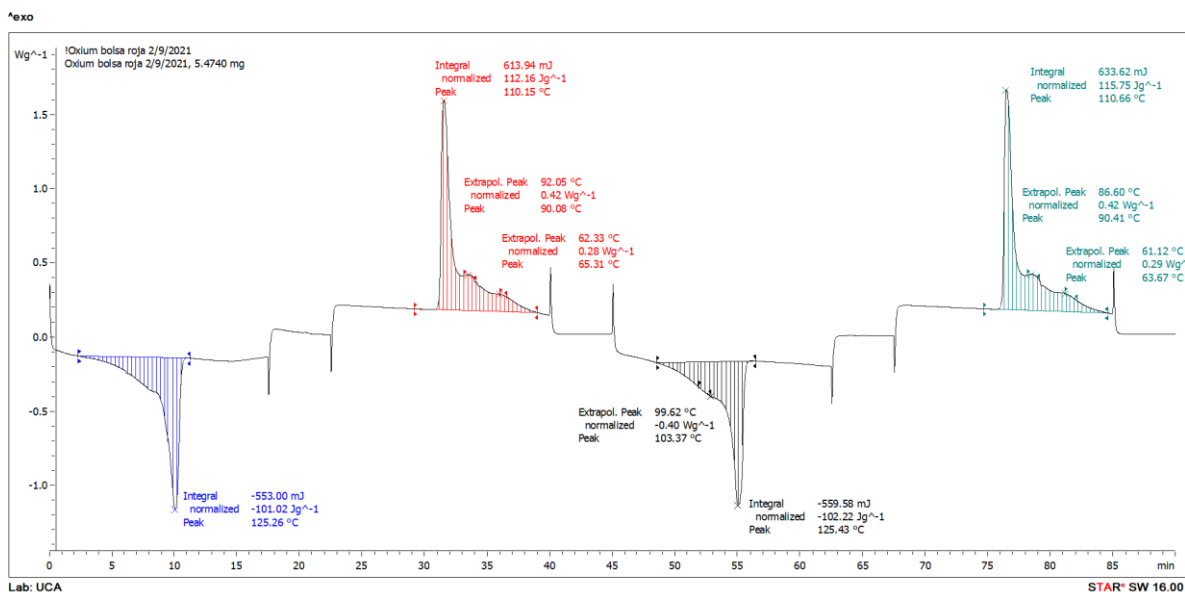


Fig.7.14 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la muestra 5 (Fuente: Elaboración propia).

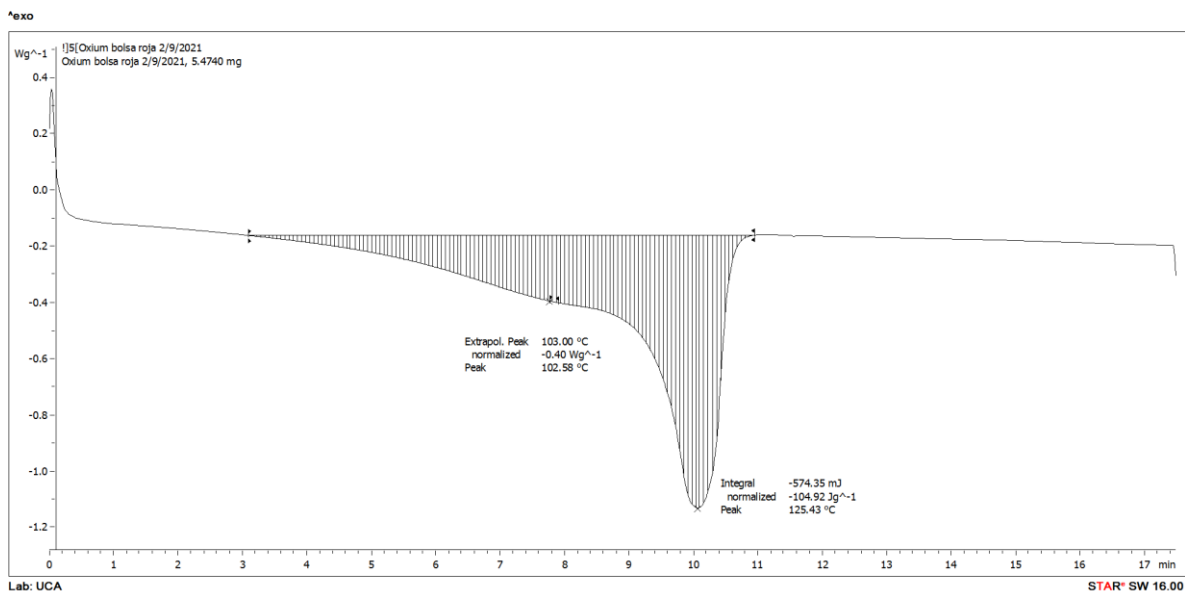


Fig.7.15 Análisis del DSC de la segunda fusión para la muestra 5 (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

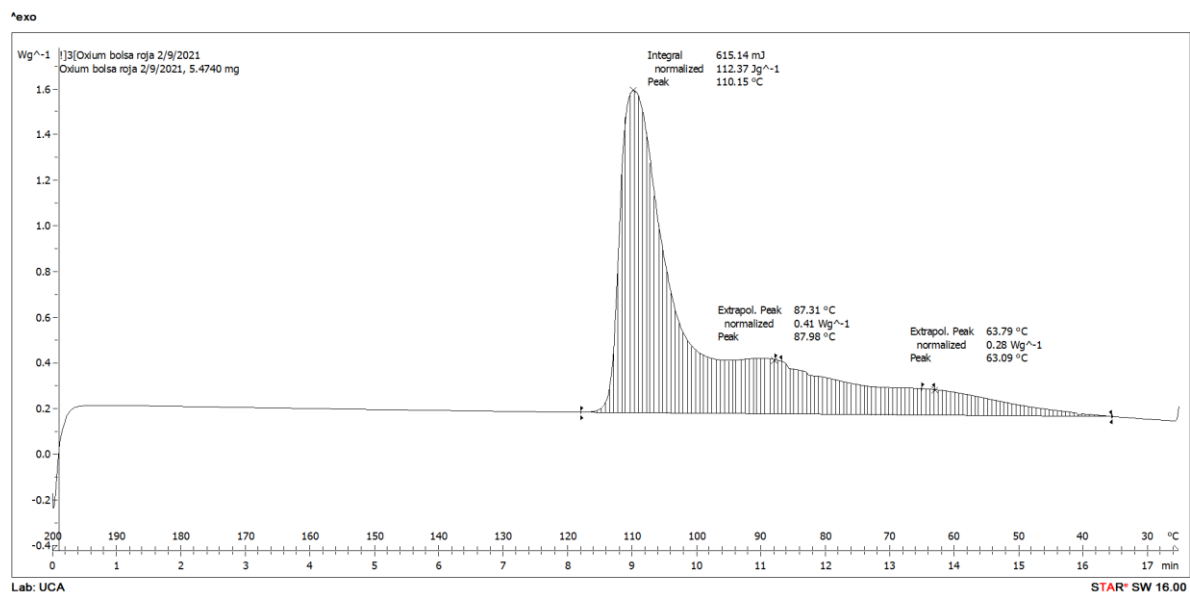


Fig.7.16 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la muestra 5 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.6. Resultados del análisis de la muestra 5.

Pico	Temperatura de fusión ( $^{\circ}C$ )	Temperatura de cristalización ( $^{\circ}C$ )	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	102.58	110.15	104.92	- Polietileno de baja densidad LDPE
2	125.43	87.98		- Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
3	-	63.09		
<b>Peso inicial (mg)</b>	49.727	<b>Peso final (mg)</b>		49.707

Fuente: Elaboración propia.

En la fig.7.17 se presentan la comparación de todas las curvas de segunda fusión. De las curvas se logra observar la diferencia existente entre la resina y los productos. Además, se puede inferir que el aditivo oxo-biodegradable no se logra visualizar mediante la fusión.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

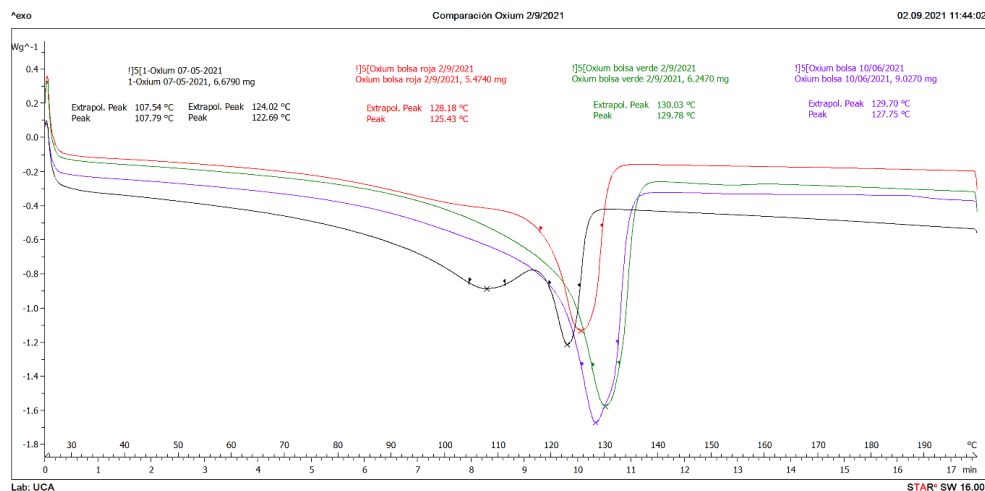


Fig.7.17. Comparaciones de curvas de fusión correspondiente a la resina y muestras Oxium (Fuente: Elaboración propia).

### 7.1.1.2 Biologic

- Biologic Resina

En las figuras 7.18, 7.19 y 7.20 se observan los resultados obtenidos para el análisis de la resina biologic. Además, en la tabla 7.7 se pueden observar las características del análisis realizado.

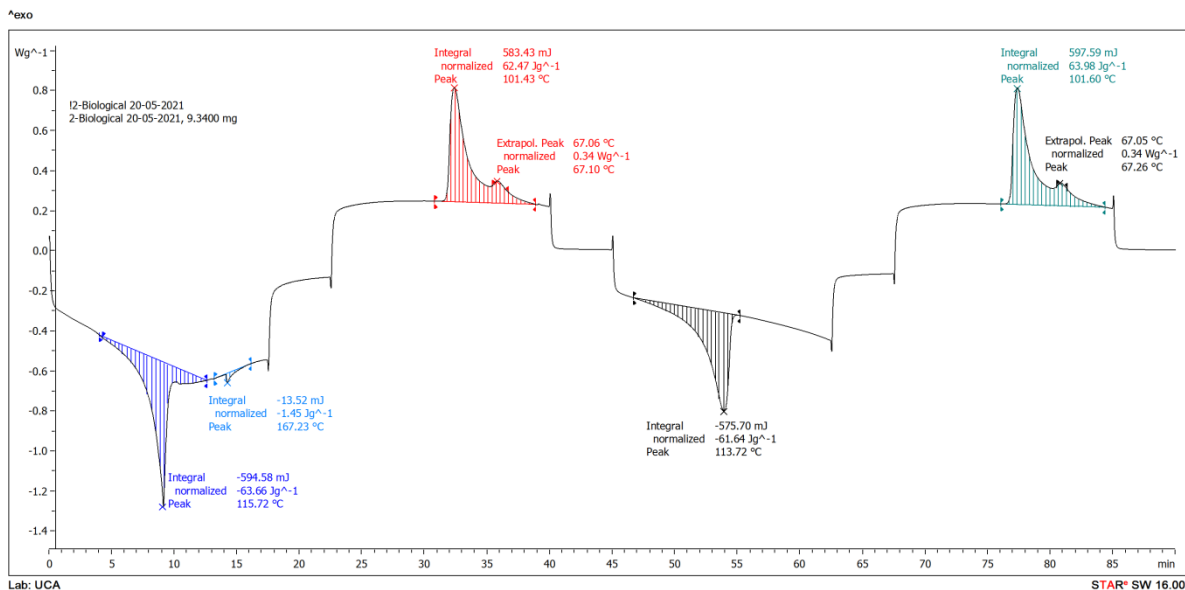


Fig..7.18 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la resina (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

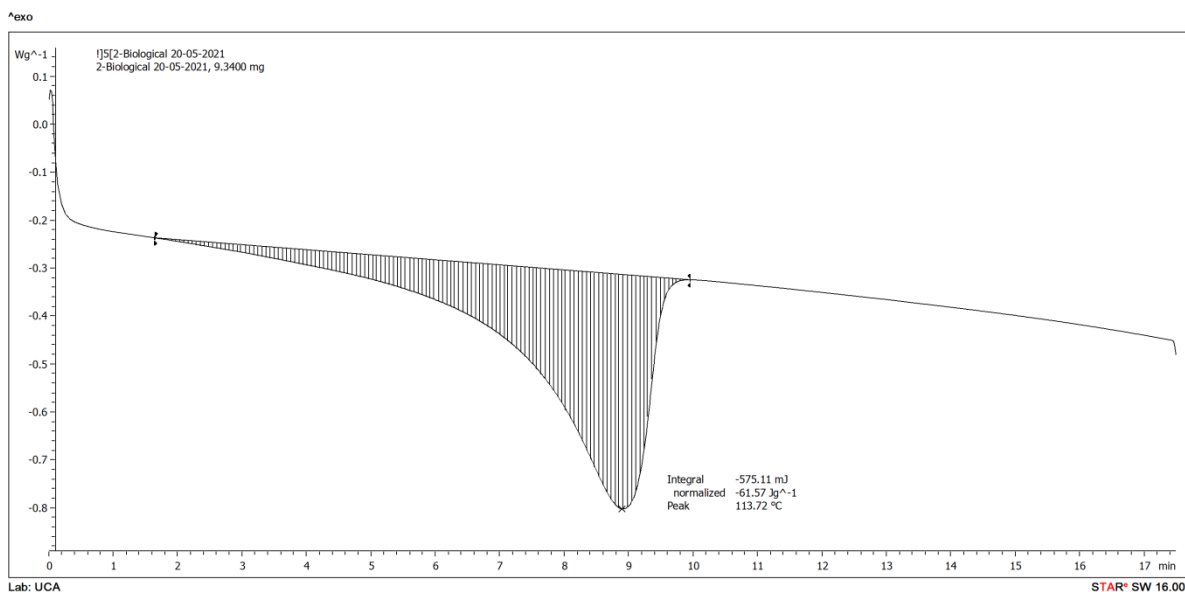


Fig.7.19 Análisis del DSC de la segunda fusión para la resina (Fuente: Elaboración propia).

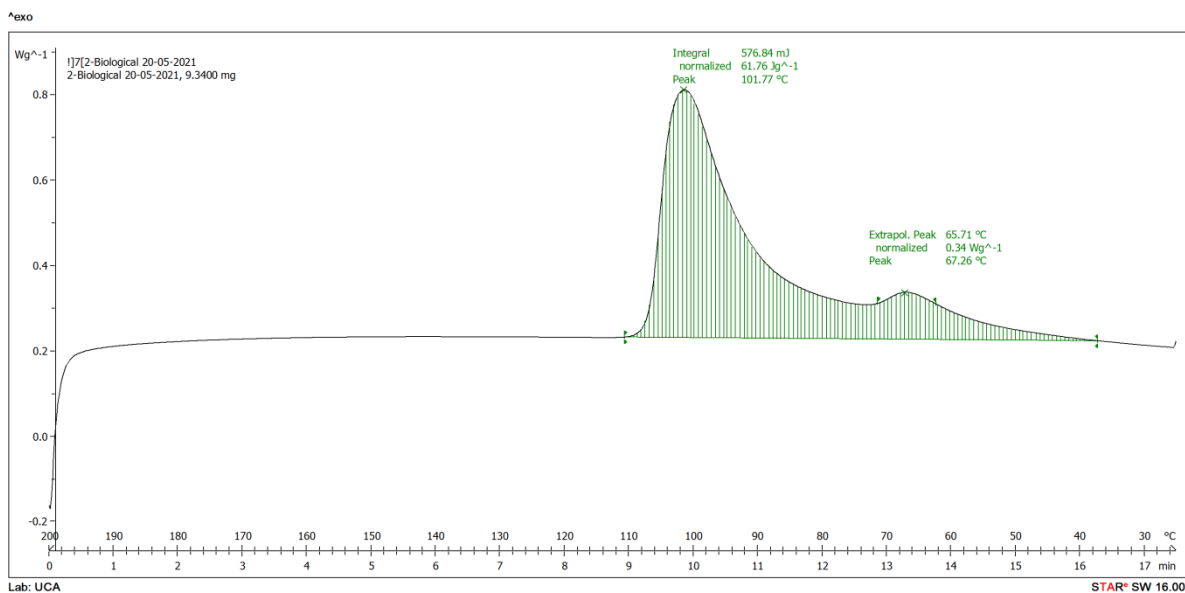


Fig.7.20 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la resina (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.7. Resultados del análisis de la resina biologic.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	113.72	101.77	61.57	Poliétileno de baja densidad LDPE
2	-	67.26		
<b>Peso inicial (mg)</b>	52.593	<b>Peso final (mg)</b>	51.923	

Fuente: Elaboración propia.



- Muestra 3

En las figuras 7.21, 7.22 y 7.23 se observan los resultados obtenidos para el análisis de muestra 3 correspondiente a la bolsa con aditivo biológico. Además, en la tabla 7.8 se pueden observar las características del análisis realizado.

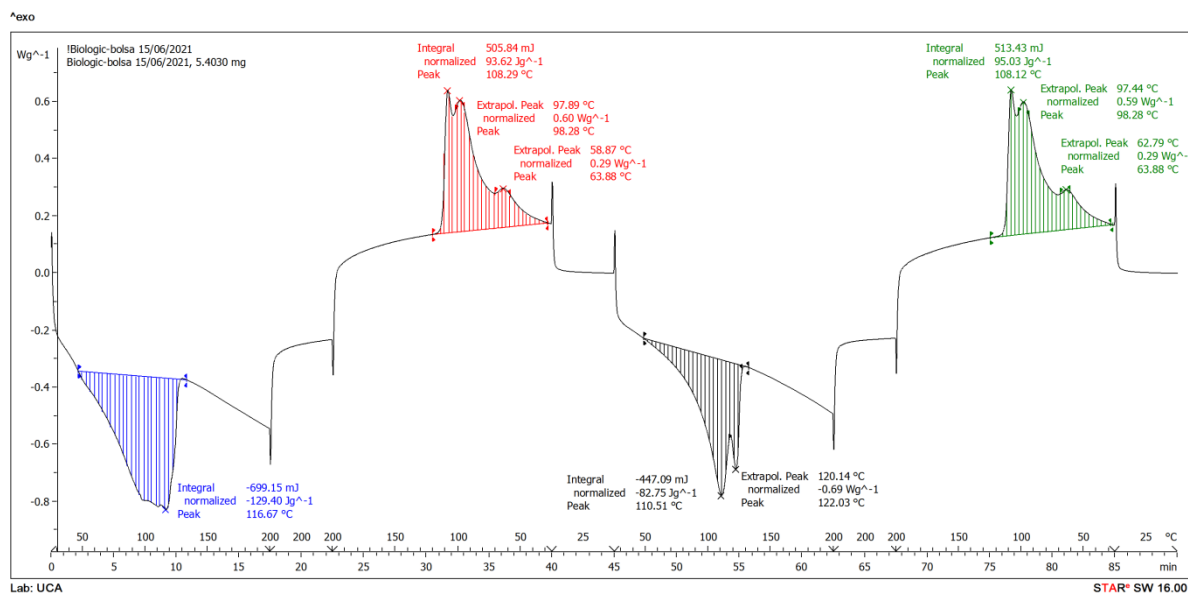


Fig.7.21 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la muestra 3 (Fuente: Elaboración propia).

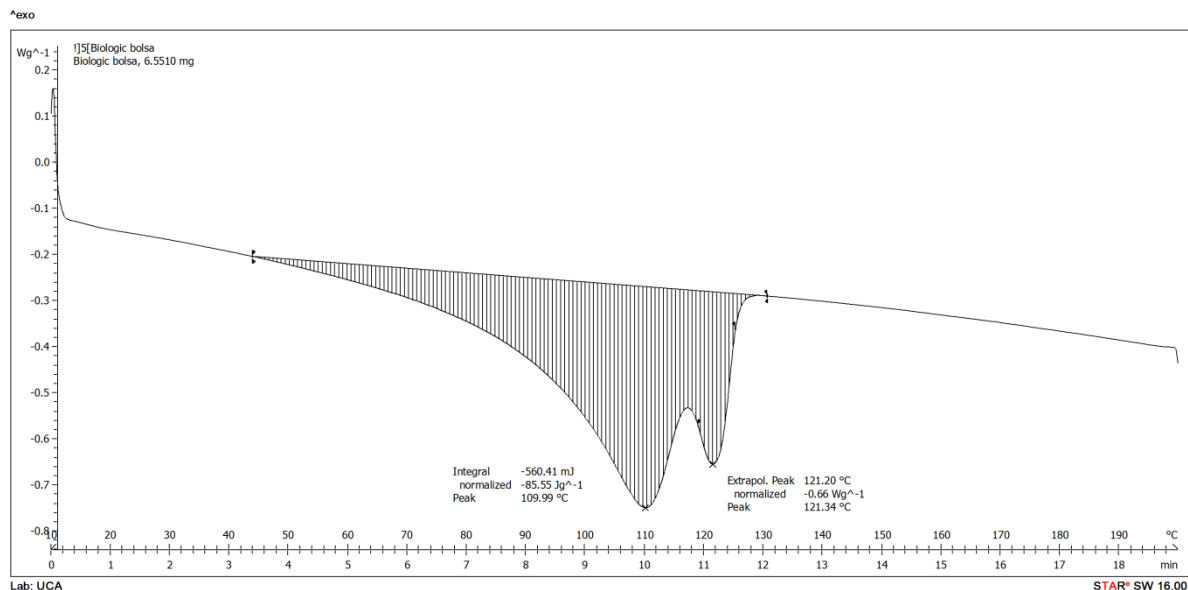


Fig.7.22 Análisis del DSC de la segunda fusión para la muestra 3 (Fuente: Elaboración propia).





“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

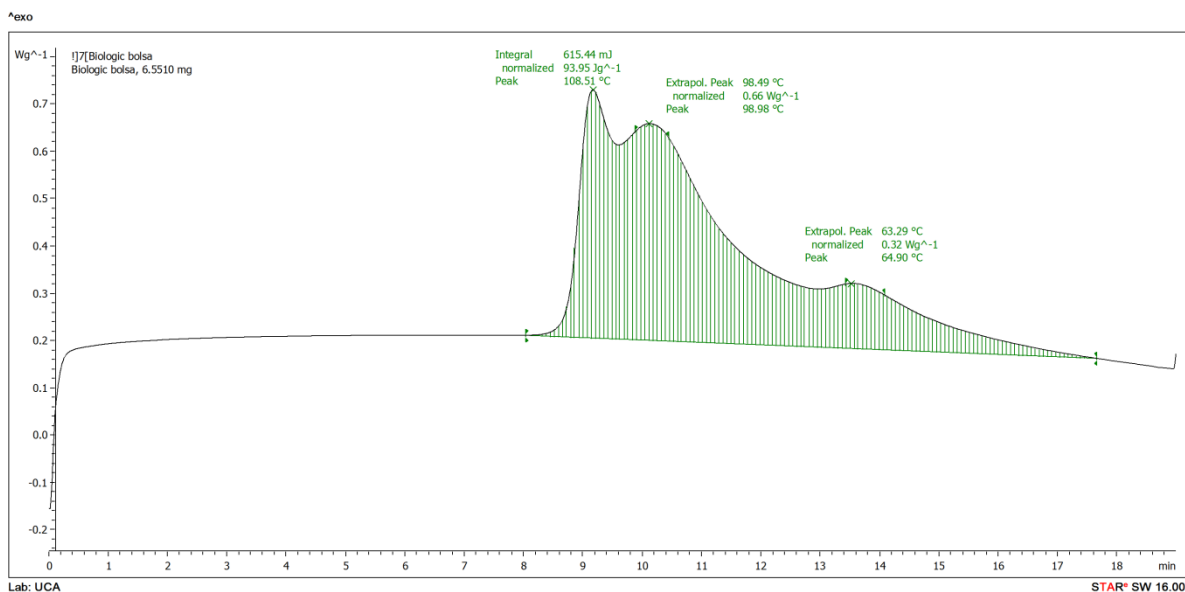


Fig.7.23 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la muestra 3 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.8. Resultados del análisis de la muestra 3.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	109.99	108.51	85.55	- Polietileno de baja densidad LDPE
2	121.34	98.98		- Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
3	-	64.90		
<b>Peso inicial (mg)</b>	49.843	<b>Peso final (mg)</b>	49.524	

Fuente: Elaboración propia.

En la fig.7.24 se observa la comparación entre la resina y la muestra para la curva de fusión del segundo calentamiento. La diferencia existente entre la resina y el producto radica en el segundo pico de fusión del producto, confirmando la presencia de otro polímero.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

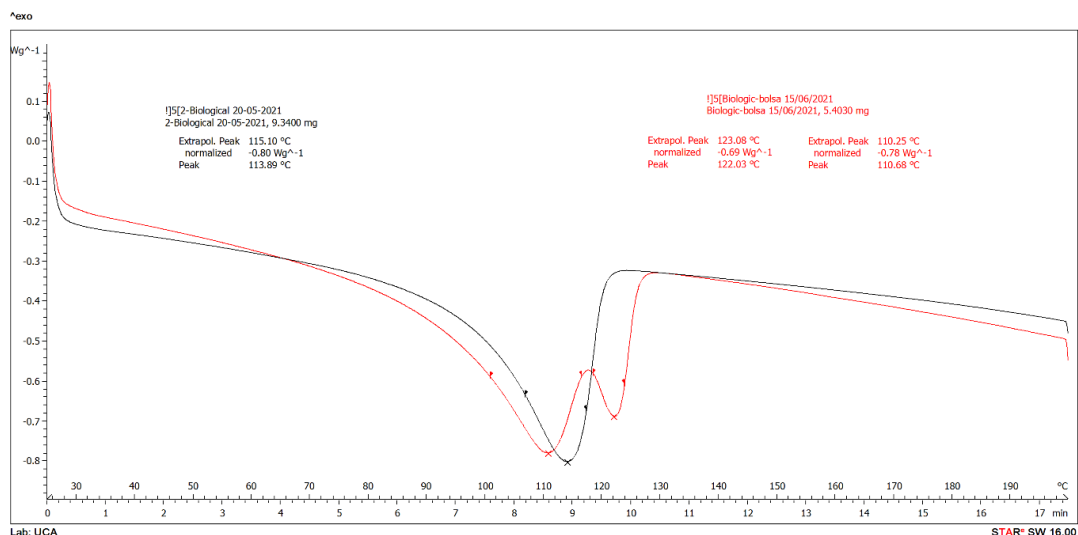


Fig.7.24 Comparaciones de curvas de fusión correspondiente a la resina y muestra Biologic (Fuente: Elaboración propia).

### 7.1.1.3 ECM

- Resina

En las figuras 7.25, 7.26 y 7.27 se observan los resultados obtenidos para el análisis de la resina ECM. Además, en la tabla 7.9 se pueden observar las características del análisis realizado.

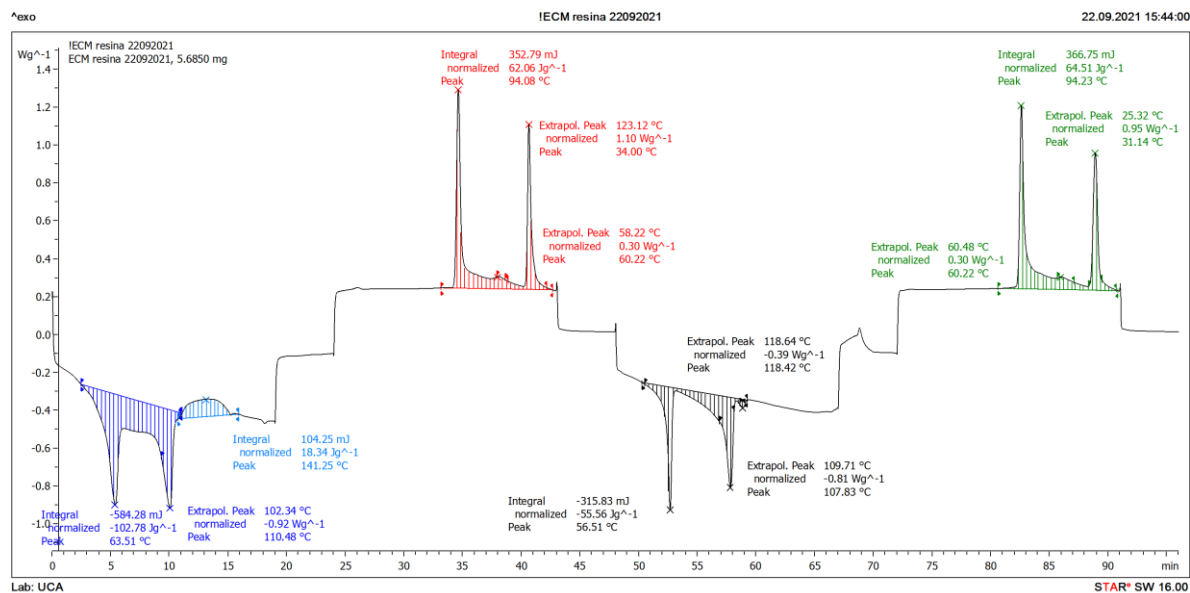


Fig.7.25 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la resina (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

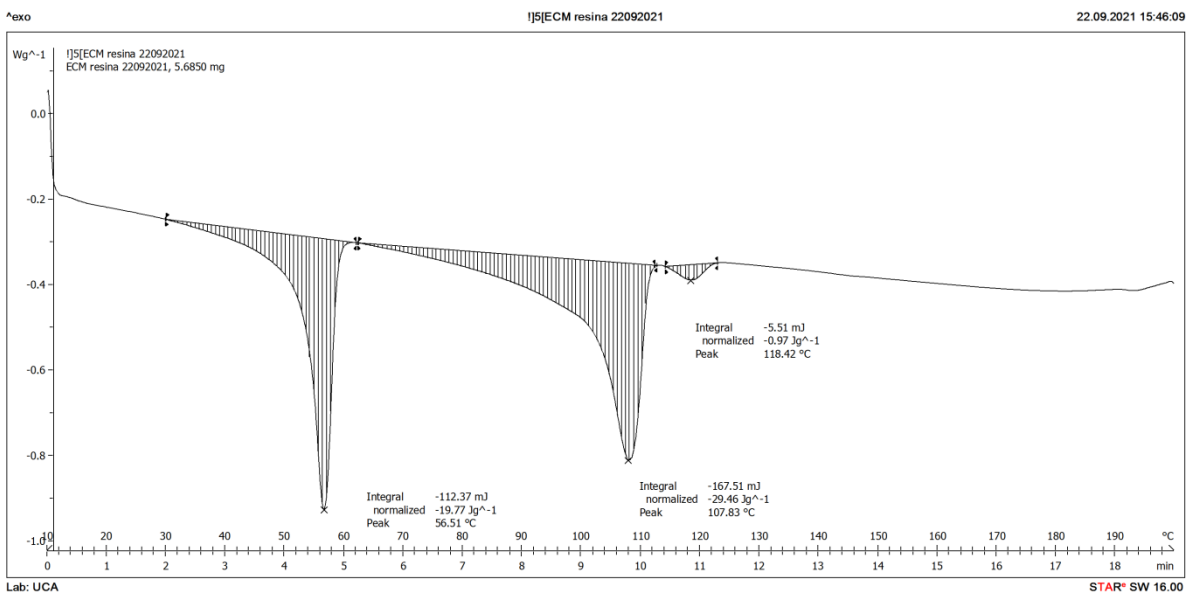


Fig.7.26 Análisis del DSC de la segunda fusión para la resina (Fuente: Elaboración propia).

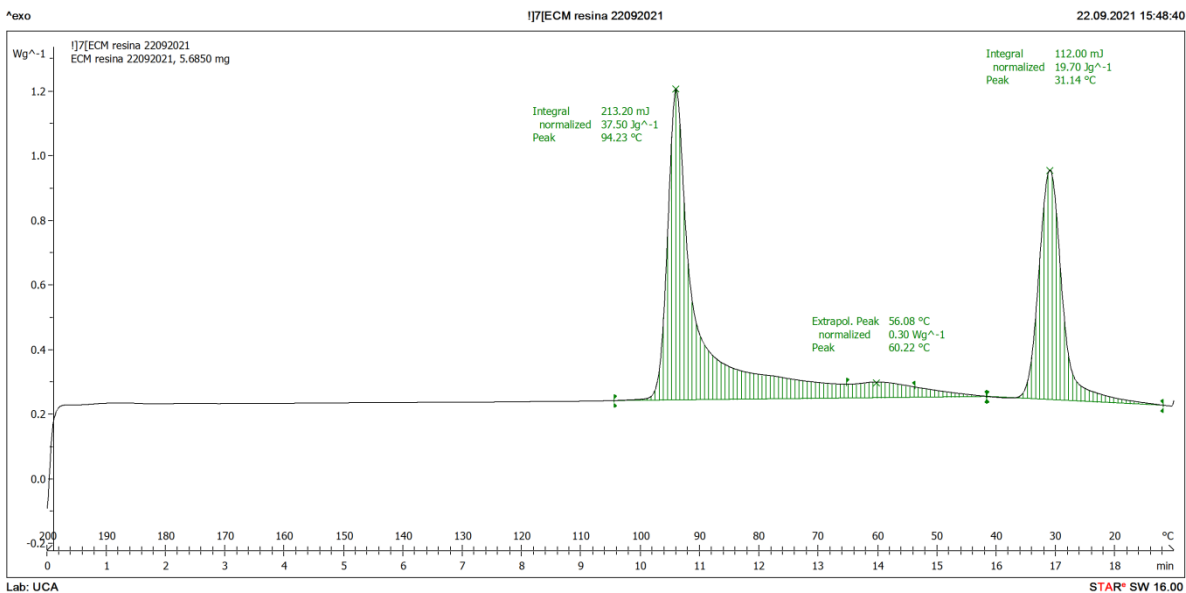


Fig.7.27 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la resina (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

Tabla 7.9 Resultados del análisis de la resina ECM.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	56.51	94.23	19.77	Temperatura de cristalización (31.14°C) y fusión (56.5°C) puede coincidir con una parafina.
2	107.83	60.22	29.46	Polietileno de baja densidad LDPE
3	118.42	31.14	0.97	Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
<b>Peso inicial (mg)</b>	49.392	<b>Peso final (mg)</b>		49.381

Fuente: Elaboración propia.

- Muestra 2

En las figuras 7.28, 7.29 y 7.30 se observan los resultados obtenidos para el análisis de muestra 2 correspondiente a la bolsa blanca con aditivo ECM. Además, en la tabla 7.10 se pueden observar las características del análisis realizado.

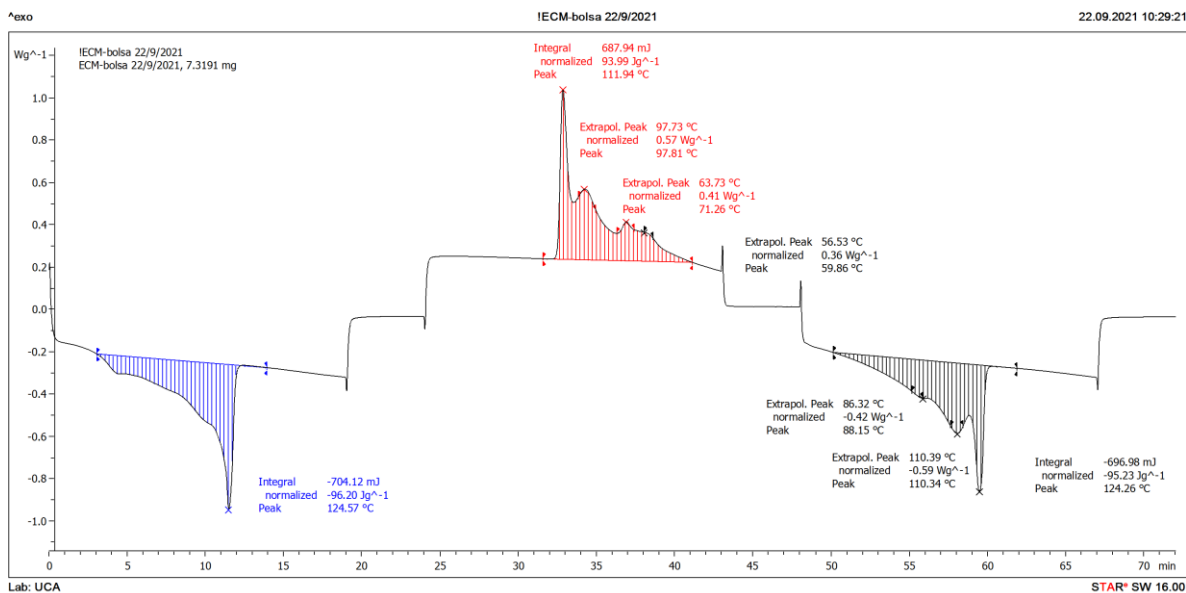


Fig.7.28 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la muestra 2 (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

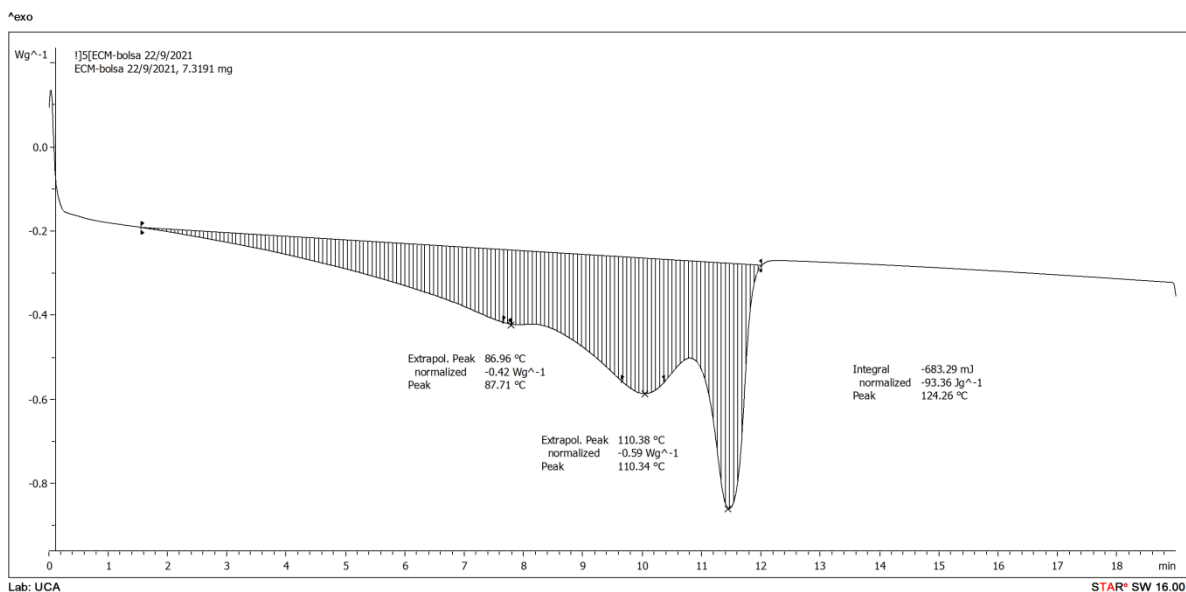


Fig.7.29 Análisis del DSC de la segunda fusión para la muestra 2 (Fuente: Elaboración propia).

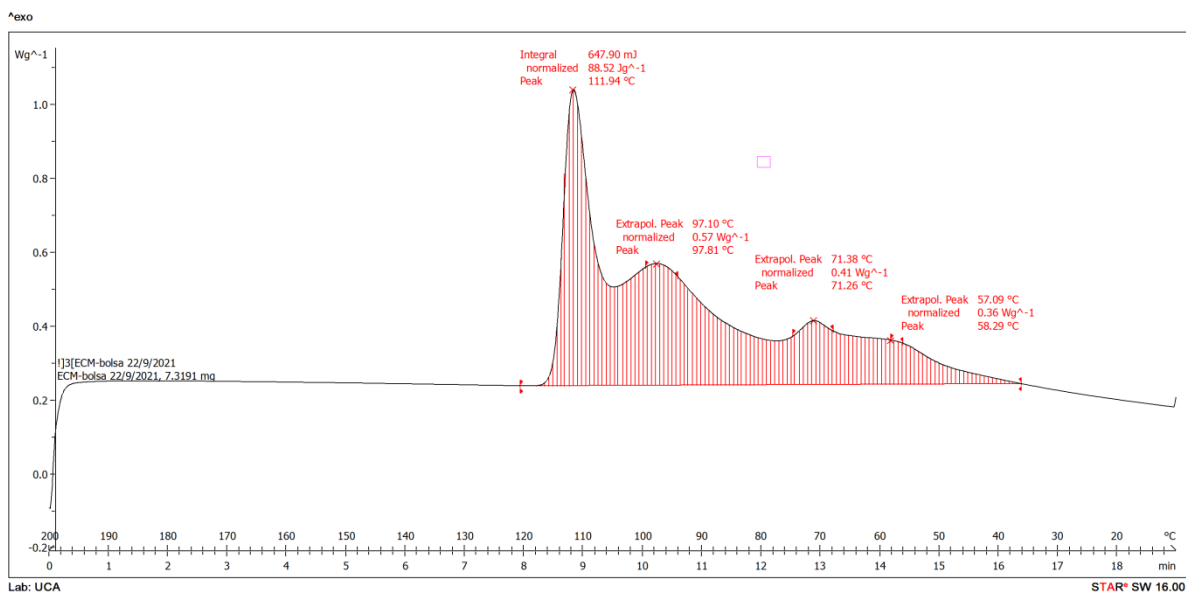


Fig.7.30 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la muestra 2 (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

Tabla 7.10. Resultados del análisis de la muestra 2.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	87.71	111.94	93.36	No identificado
2	110.34	97.10		- Polietileno de baja densidad LDPE
3	124.26	71.26		- Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
4	-	58.29		
<b>Peso inicial (mg)</b>	49.611	<b>Peso final (mg)</b>		49.621

Fuente: Elaboración propia.

- Muestra 7

En las figuras 7.31, 7.32 y 7.33 se observan los resultados obtenidos para el análisis de la muestra 7 correspondiente a la bolsa negra con aditivo ECM. Además, en la tabla 7.11 se pueden observar las características del análisis realizado.

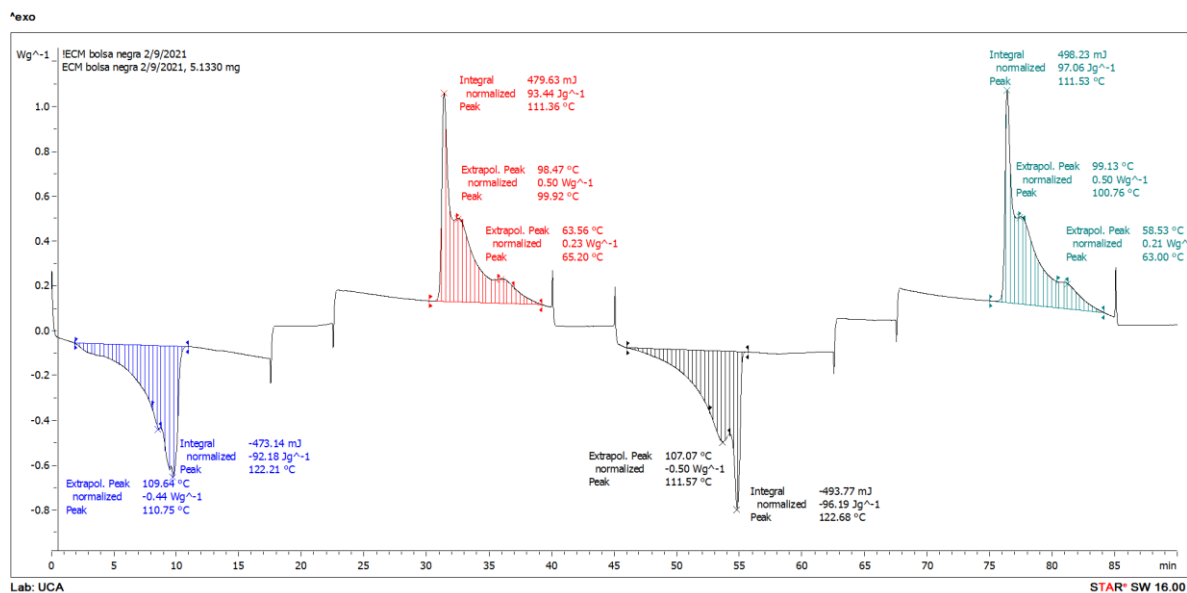


Fig.7.31 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la muestra 7 (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

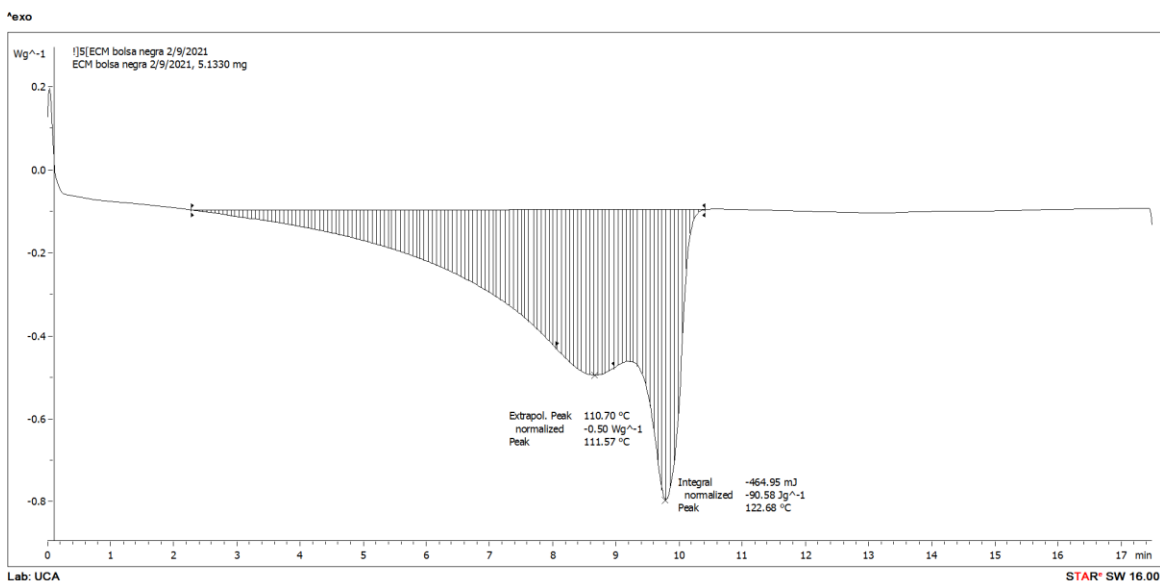


Fig.7.32 Análisis del DSC de la segunda fusión para la muestra 7 (Fuente: Elaboración propia).

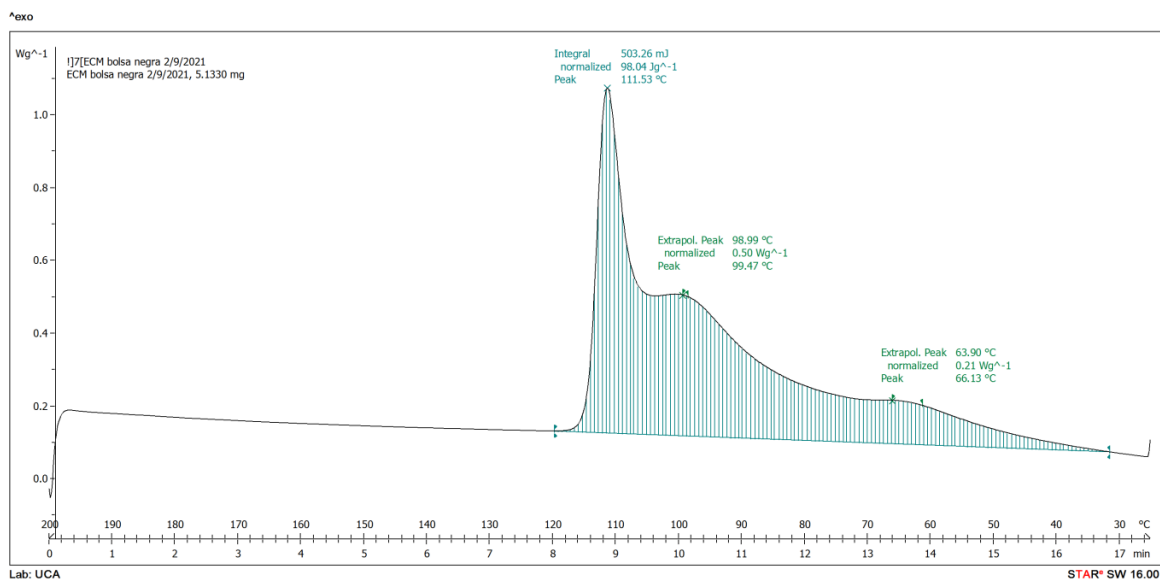


Fig.7.33 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la muestra 7 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.11. Resultados del análisis de la muestra 7.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	110.70	111.53	90.58	- Polietileno de baja densidad LDPE - Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
2	122.68	99.47		
3	-	66.13		
Peso inicial (mg)	48.334	Peso final (mg)	48.332	

Fuente: Elaboración propia.



En la figura 7.34 se observa la comparación entre la resina y las muestras para las curvas de fusión de los segundos calentamientos.

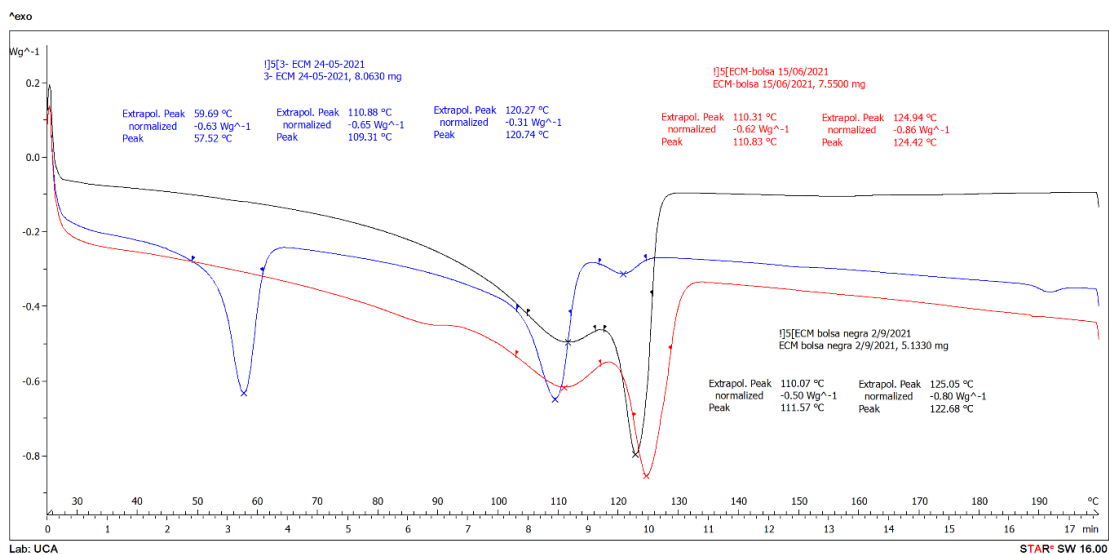


Fig.7.34. Comparaciones de curvas de fusión correspondiente a la resina y muestras ECM (Fuente: Elaboración propia).

#### 7.1.1.4 PBS

- Resina PBS

En las figuras 7.35, 7.36 y 7.37 se observan los resultados obtenidos para el análisis de la resina PBS. Además, en la tabla 7.12 se pueden observar las características del análisis realizado.





“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

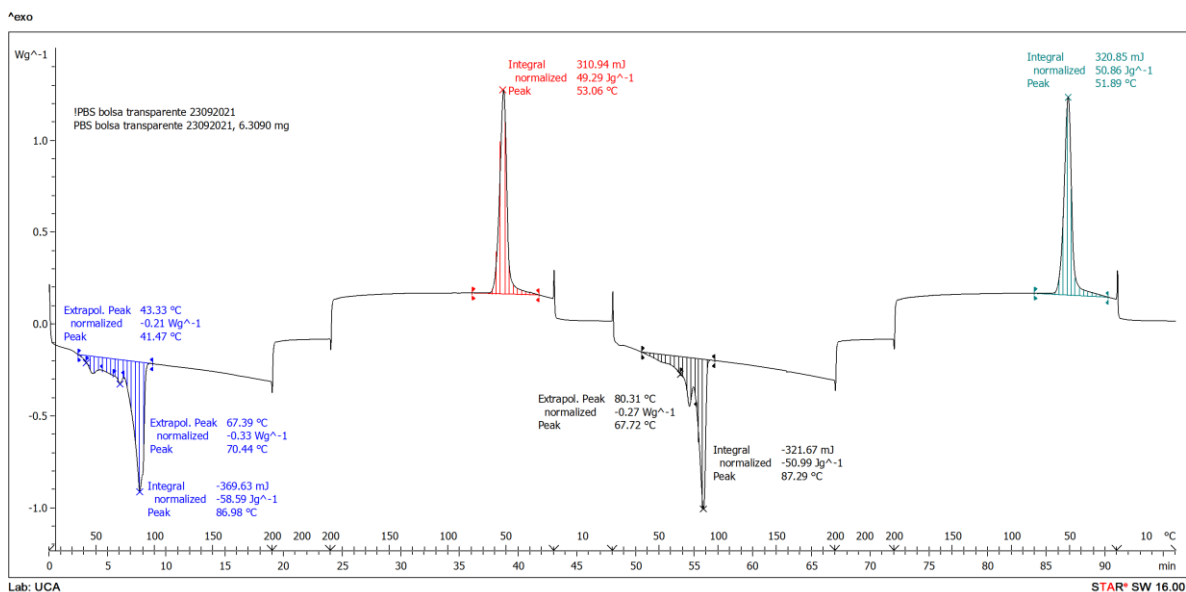


Fig.7.35 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la resina (Fuente: Elaboración propia).

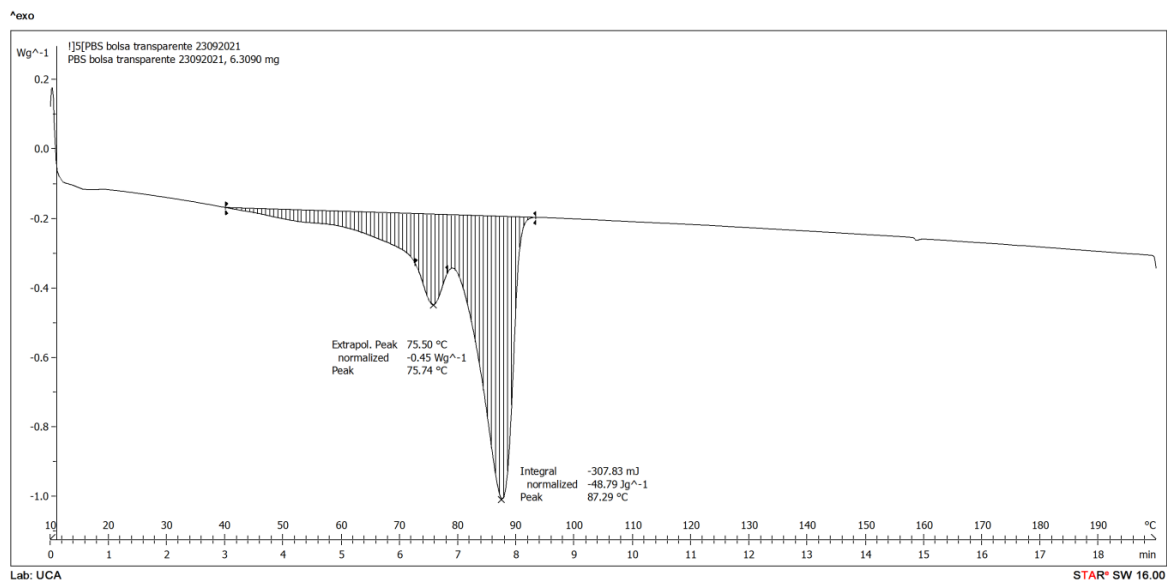


Fig.7.36 Análisis del DSC de la segunda fusión para la resina (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

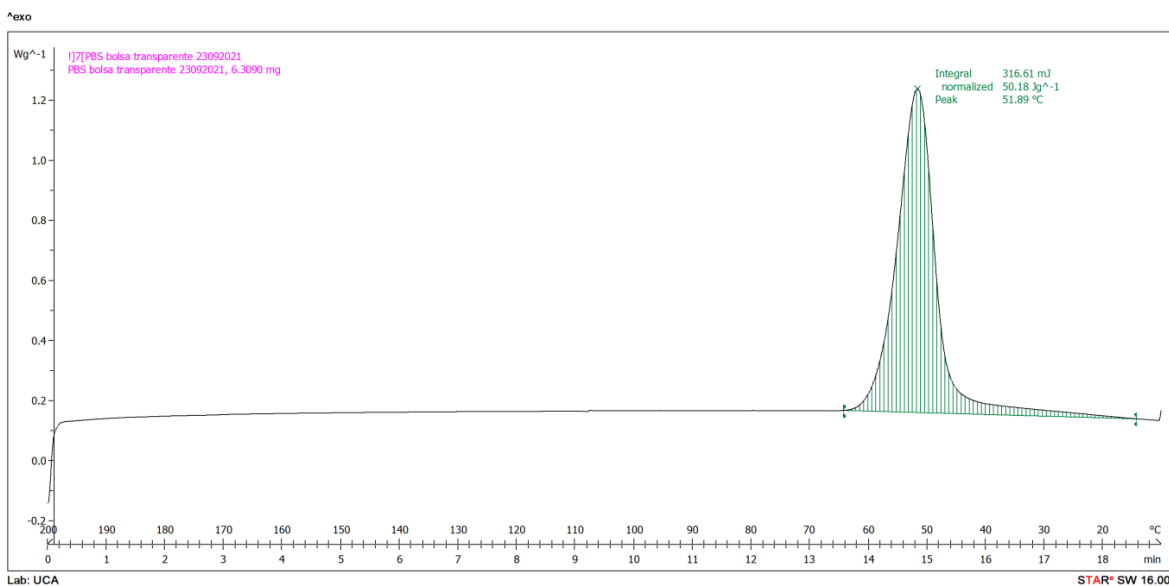


Fig.7.37 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la resina (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.12. Resultados del análisis de la resina PBS.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	75.74	51.89	48.79	No identificado (posiblemente es una mezcla de varias resinas)
2	87.29	-		
<b>Peso inicial (mg)</b>	52.116	<b>Peso final (mg)</b>	51.880	

Fuente: Elaboración propia.

- Resina Celofán

En la figura 7.38 se observan los resultados obtenidos para el análisis de la resina Celofán. Además, en la tabla 7.13 se pueden observar las características del análisis realizado.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

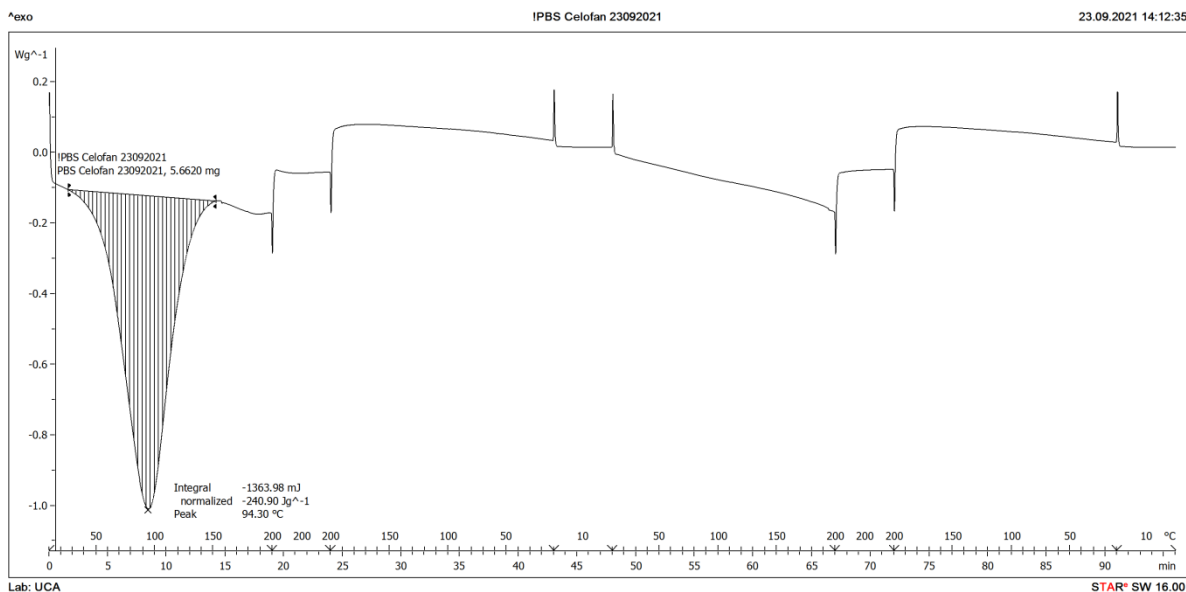


Fig.7.38. Análisis realizados para la resina PBS en el DSC: programa completo de temperatura (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.13. Resultados del análisis de la resina Celofán.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	94.30	240.90	celulosa
<b>Peso inicial (mg)</b>	49.145	<b>Peso final (mg)</b>	48.764

Fuente: Elaboración propia.

- Muestra 6

En las figuras 7.39, 7.40, 7.41 se observan los resultados obtenidos para el análisis de la muestra 6 correspondiente a la bolsa gris. Además, en la tabla 7.14 se pueden observar las características del análisis realizado.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

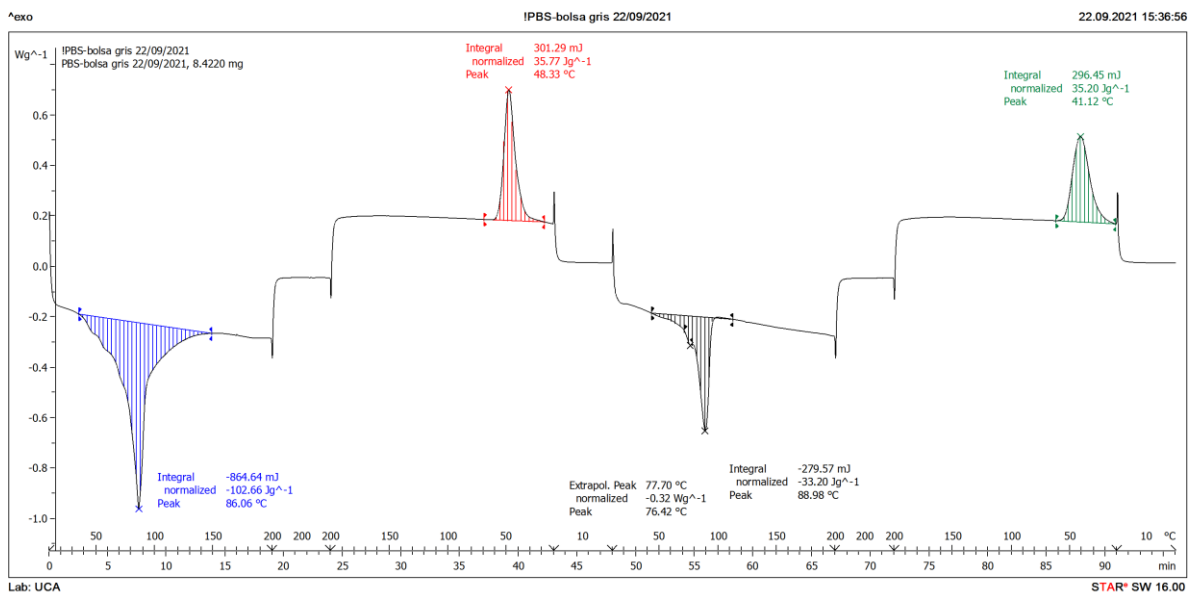


Fig.7.39 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la muestra 6 (Fuente: Elaboración propia).

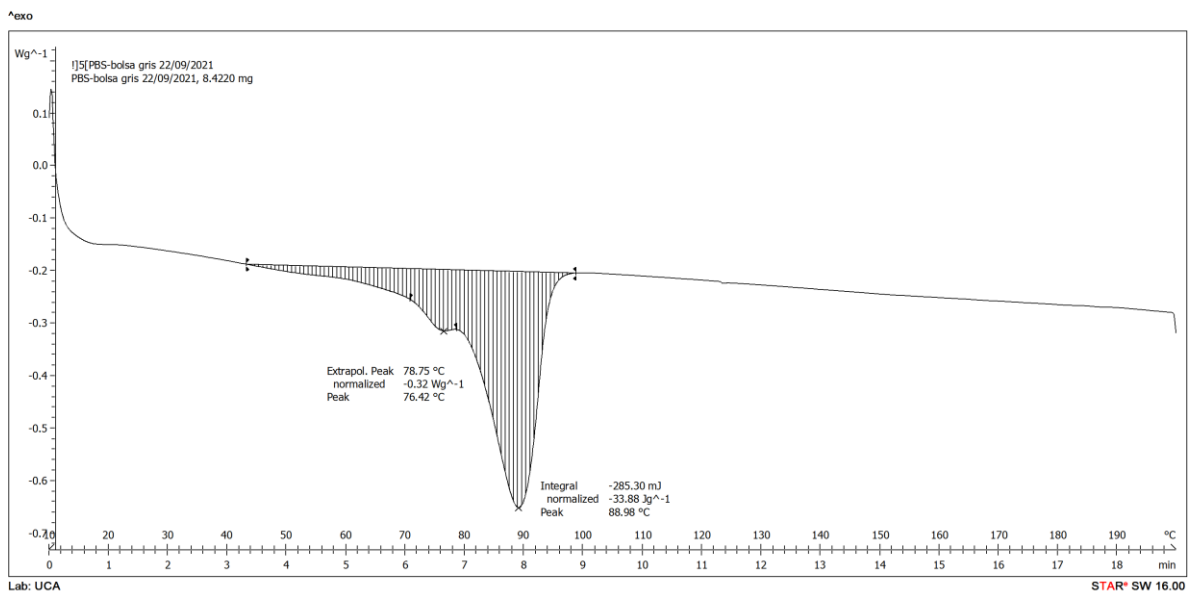


Fig.7.40 Análisis del DSC de la segunda fusión para la muestra 6 (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

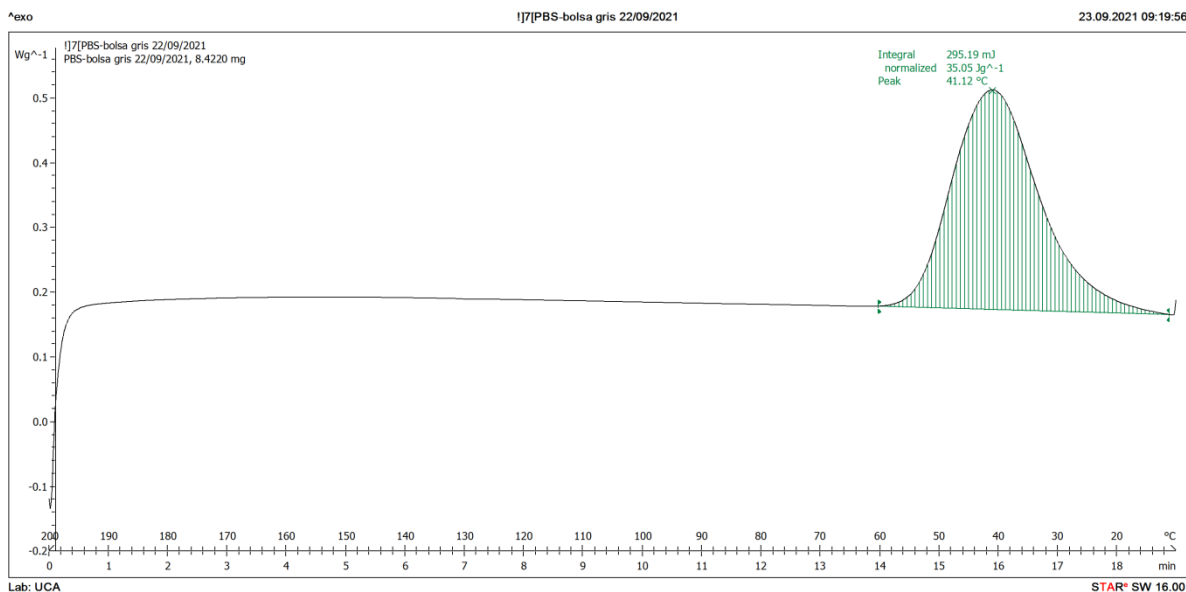


Fig.7.41 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la muestra 6 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.14. Resultados del análisis de la muestra 6.

Pico	Temperatura de fusión ( $^{\circ}C$ )	Temperatura de cristalización ( $^{\circ}C$ )	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	76.42	41.12	33.88	No identifica (posiblemente mezcla de varias resinas)
2	88.98	-		
Peso inicial (mg)	48.956	Peso final (mg)	49.949	

Fuente: Elaboración propia.

#### 7.1.1.5 P-life

- Muestra 8

En las figuras 7.42, 7.43, 7.44 se observan los resultados obtenidos para el análisis de la muestra 8 correspondiente a la bolsa blanca. Además, en la tabla 7.15 se pueden observar las características del análisis realizado.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

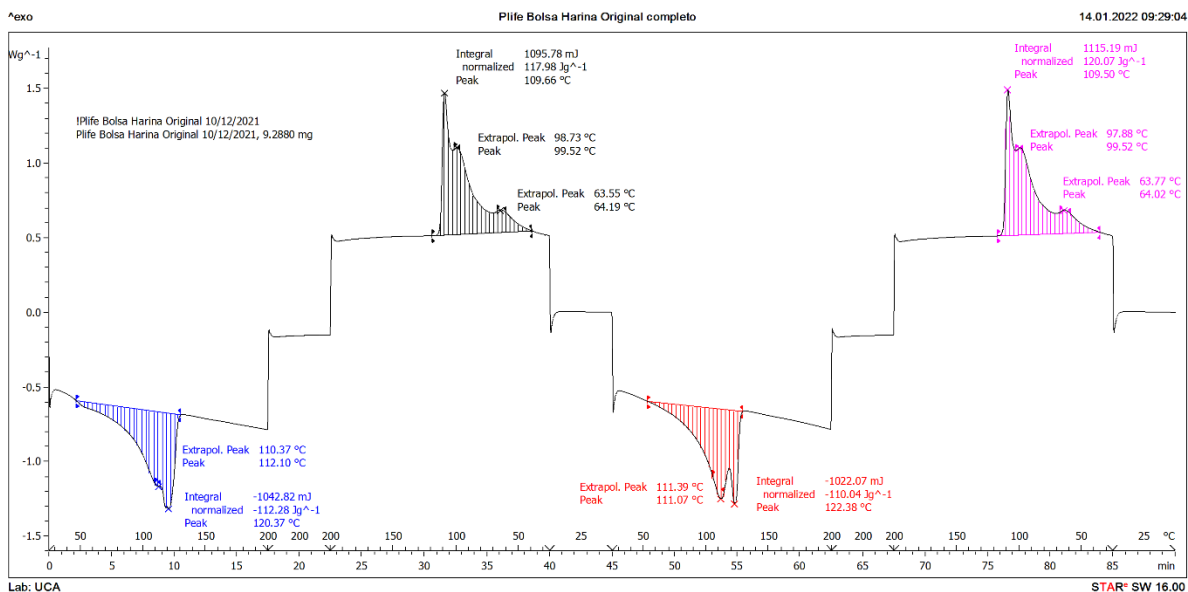


Fig.7.42 Análisis del DSC del programa completo de temperatura para la muestra 8 (Fuente: Elaboración propia).

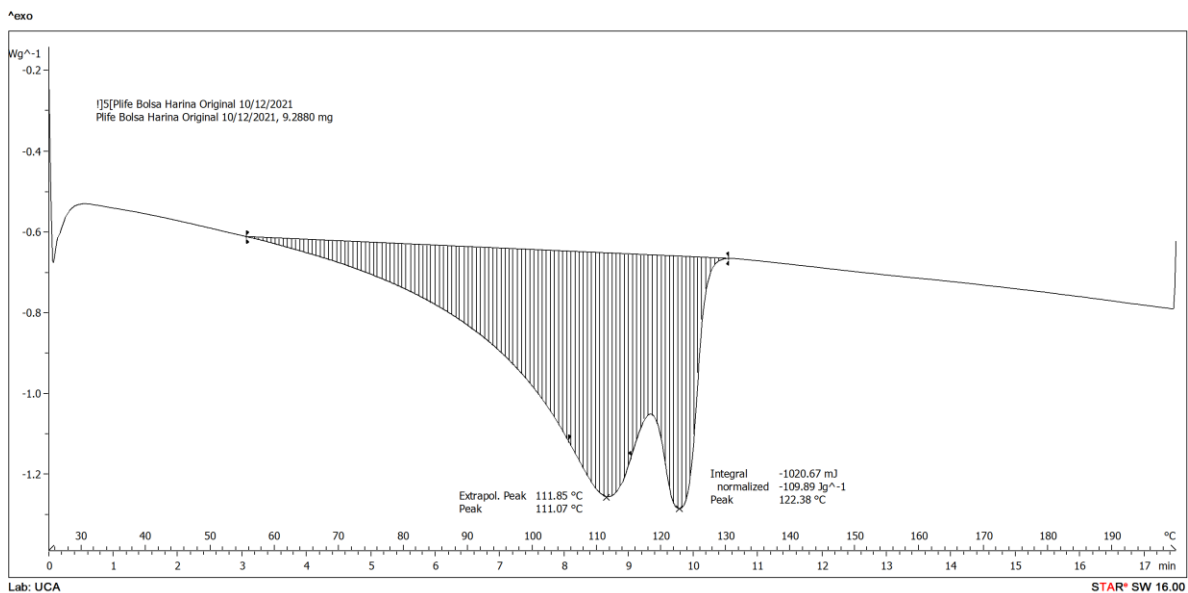


Fig.7.43 Análisis del DSC de la segunda fusión para la muestra 8 (Fuente: Elaboración propia).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

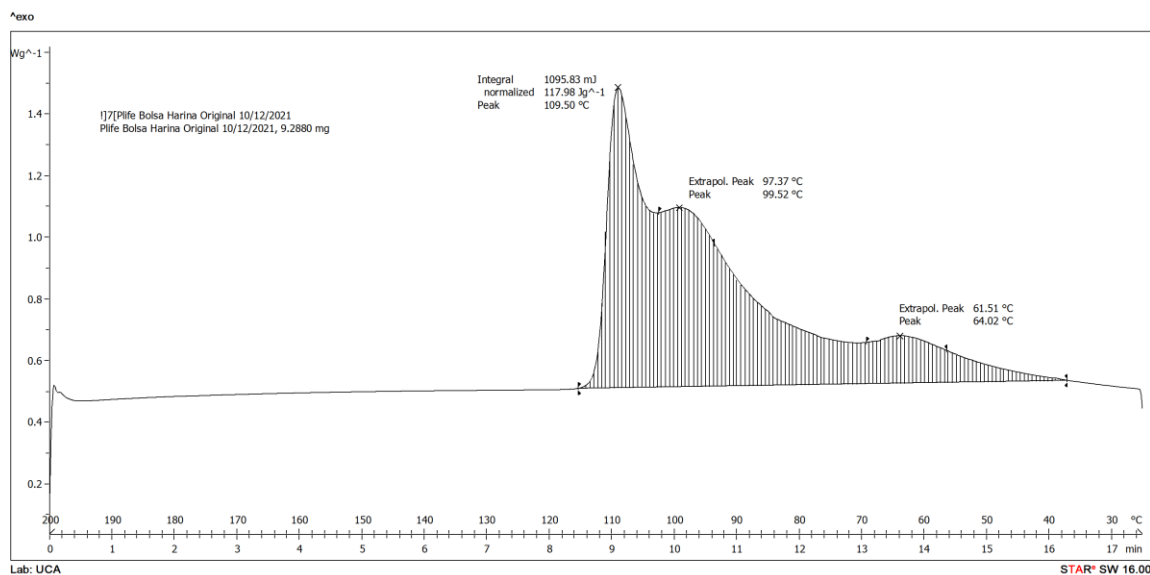


Fig.7.44 Análisis del DSC de la segunda cristalización para la muestra 8 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 7.15. Resultados del análisis de la muestra 8.

Pico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de cristalización (°C)	$\Delta H_f$ (J/g)	Polímeros identificados
1	111.07	64.02	109.89	- Polietileno de baja densidad LDPE
2	122.38	99.52		- Polietileno lineal de baja densidad LLDPE
3	-	109.50		
<b>Peso inicial (mg)</b>	48.956	<b>Peso final (mg)</b>		48.956

Fuente: Elaboración propia.

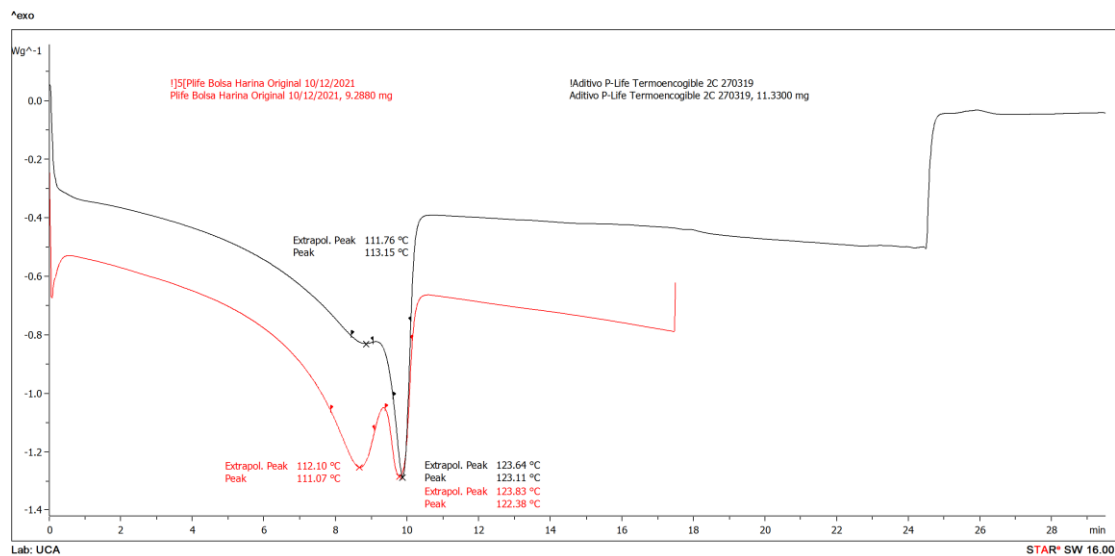


Fig.7.45. Comparaciones de curvas de segunda fusión correspondiente a la resina P-life y muestra 8 (Fuente: Elaboración propia)



## 7.1.2 Resultados de prueba de biodegradabilidad

### 7.1.2.1 Caracterización del suelo

El tipo de suelo a utilizar en los ensayos de biodegradabilidad, es del tipo tierra negra sin tratar, la cual fue adquirida en vivero local.

Los resultados de humedad y ceniza se realizaron en dos ocasiones debido a que se hicieron dos pruebas de biodegradabilidad sin pretratamiento (analizando diferentes muestras en cada prueba), y a pesar de ser el mismo suelo, estos factores se pudieron ver modificados debido a la poca hermeticidad del recipiente donde se guardó este para la segunda prueba.

- Contenido de Humedad

Para la prueba se utilizó suelo de un vivero, se tamizó y luego se pesaron 50 g en cada una de las 6 cápsulas de porcelana previamente secadas. Las muestras de suelo pasaron en el horno alrededor de 16 horas a 105°C (Fig.7.46).



Fig.7.46 Secado del suelo en horno a 105°C. Fuente: Elaboración propia.

Luego se colocaron una hora al desecador y por último se pesaron nuevamente. Se utilizó la ecuación 6.1 para poder obtener los resultados de humedad que se muestran en la tabla 7.16.





Tabla 7.16 Contenido de humedad del suelo

Contenido de Humedad		
	Prueba 1	Prueba 2
#1	21.87%	19.42%
#2	21.81%	19.62%
#3	21.91%	19.60%
#4	22.39%	19.92%
#5	22.21%	19.86%
#6	22.18%	19.68%

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos anteriores se obtiene la media correspondiente a 22.06% para la prueba 1 y 19.68% de humedad para la prueba 2, dichos valores son considerablemente cercanos, por lo cual el suelo no perdió mucha humedad entre una prueba y otra.

- Contenido de Ceniza a 440°C

Para la prueba, se utilizaron las cápsulas con suelo seco (utilizadas para la prueba de contenido de humedad) y se colocaron en la mufla a 440°C por una hora (Fig.7.47).



Fig.7.47 Colocación del suelo en la mufla a 440°C. Fuente: Elaboración propia.

Al enfriarse (60°C como mínimo), se colocaron en el desecador por 50 min y luego se pesaron. Utilizando la ecuación 6.2 se obtuvieron los resultados de ceniza para ambas pruebas (tabla 7.17).



Tabla 7.17 Contenido de ceniza en el suelo

Contenido de Ceniza		
	Prueba 1	Prueba 2
#1	94.12%	93.89%
#2	93.61%	93.75%
#3	94.25%	93.85%
#4	93.99%	94.32%
#5	94.10%	94.22%
#6	94.12%	94.05%

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos anteriores se obtiene la media correspondiente a 93.95% para la prueba 1 y 94.01% de ceniza para la prueba 2, debido a que los porcentajes son similares, no se considera un cambio significativo en el suelo utilizado primero y el utilizado después.

- Material orgánico

Para obtener el contenido orgánico se utiliza la ecuación 6.3, obteniendo los resultados de la tabla 7.18

Prueba 1:

Tabla 7.18 Contenido de material orgánico del suelo

Contenido de MO		
	Prueba 1	Prueba 2
#1	5.88%	6.11%
#2	6.39%	6.25%
#3	5.75%	6.15%
#4	6.01%	5.68%
#5	5.90%	5.78%
#6	6.40%	5.95%

Fuente: Elaboración propia.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

Con los datos anteriores se obtiene la media correspondiente a 6.055% para la prueba 1 y 5.986% de material orgánico para la prueba 2.

- Determinación de pH en suelo

Para la prueba de pH se colocaron 10g de suelo en cada beaker, en los cuales tres se diluyeron con 30 mL de solución de cloruro de calcio 0.01M y los tres restantes en 30mL de agua destilada. En cada toma se procuró esperar al menos 5 segundos luego de que el valor estabilizara (Fig.7.48).



Fig.7.48 Medición de pH del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la prueba se muestran en las tablas 7.19 y 7.20:

Tabla 7.19 pH del suelo en cloruro de calcio.

pH de suelo (en CaCl <sub>2</sub> )	
#1	5.03
#2	4.99
#3	5.02
$\bar{X}$	5.01

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 7.20 pH del suelo en agua

pH de suelo (en agua)	
#1	5.61
#2	5.75
#3	5.74
$\bar{X}$	5.70

Fuente: Elaboración propia.

- Determinación del contenido de nitrógeno

Es importante calcular la normalidad del dicromato de potasio con el peso real, el cual fue de 4.9035g para 100mL de solución, dando como resultado una concentración de 1.0000N.

En esta prueba, el cambio de color va de un rojizo amarillento a un verde brillante (Fig.7.49).



Fig.7.49 Viraje final de la titulación. Fuente: Elaboración propia.

Al llegar al punto de viraje se obtuvieron los mililitros gastados de sulfato de hierro, los cuales se muestran en la tabla 7.21, tanto para muestras como para blancos.



Tabla 7.21 volumen de sulfato de hierro gastado.

Volumen gastado de sulfato de hierro	
R1	15.3mL
R2	15.7mL
R3	15.1mL
B1	17.9mL
B2	18.1mL

Fuente: Elaboración propia.

Con los mililitros gastados por el blanco, se puede conocer la normalidad del titulante (sulfato de hierro), presentada en la tabla 7.22:

Tabla 7.22 pH Concentración del titulante.

Concentración del $FeSO_4$	
B1	0.5587N
B2	0.5525N
$\bar{X}$	0.5556N

Fuente: Elaboración propia.

Luego se puede obtener el porcentaje de carbono de cada una de las réplicas utilizando la ecuación a continuación:

$$\%C = [FeSO_4] * (Vb - Vm) * \frac{12}{4000} * \frac{1}{z} * \frac{100}{m} \quad \text{Ec.7.1}$$

Donde:

Vb= Volumen gastado en blanco.

Vm= Volumen gastado en muestra.

z= Factor de recuperación de Walkley (z=0.77)

m= Masa muestra.



Dando los resultados de la tabla 7.23:

Tabla 7.23 Porcentaje de carbono en muestra de suelo

%C en muestras	
R1	2.31%
R2	1.97%
R3	2.50%
$\bar{X}$	2.26%

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos anteriores, se calcula el material orgánico para luego obtener el contenido de nitrógeno del suelo (ecuación 6.6), como se muestra en la tabla 7.24.

Tabla 7.24 Porcentaje de nitrógeno en muestra de suelo

%N en muestras	
R1	0.19%
R2	0.17%
R3	0.21%
$\bar{X}$	0.19%

Fuente: Elaboración propia.

### 7.1.2.2 Prueba de biodegradabilidad

- Relación C/N del suelo

Para cada sistema fue necesario colocar 8g de muestra, salvo en el blanco y en el control técnico, en los cuales se colocaron 200g de suelo (Fig.7.50).



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”



Fig.7.50 Sistema de biodegradación armado. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de cumplir la relación carbono/nitrógeno de 10:1-20:1, fue necesario obtener el porcentaje de carbono por gramo de muestra, los cuales se muestran en la tabla 7.25:

Tabla 7.25 Porcentaje de carbono en muestra de polímero.

Descripción	Material	%C en muestra
Muestra 1	Polietileno +Oxium	85%
Muestra 2	Polietileno +ECM	85%
Muestra 3	Polietileno +Biologic	65%
Muestra 4	Polietileno +Oxium	85%
Muestra 5	Polietileno +Oxium	85%
Muestra 6	Celofan + PBS	88%
Muestra 7	Polietileno +ECM	85%
Control Positivo 1	Celulosa	44%
Control Positivo 2	Celulosa	44%

Fuente: Elaboración propia.

Conociendo la cantidad de muestra y los porcentajes de carbono se obtiene la relación C/N utilizando el valor obtenido de nitrógeno de suelo (0.19%) como base. Los resultados se observan en la tabla 7.26:



Tabla 7.26 Relación C/N

Descripción	Cantidad de muestra	Relación C/N en el sistema
Muestra 1	8g	17.49
Muestra 2	8g	17.49
Muestra 3	8g	13.37
Muestra 4	8g	17.49
Muestra 5	8g	17.49
Muestra 6	8g	18.11
Muestra 7	8g	17.49
Control Positivo 1	8g	9.15
Control Positivo 2	8g	9.15

Fuente: Elaboración propia.

Considerando que el valor deseado de la relación carbono-nitrógeno es 10-20 podemos observar que la mayoría cumple con este intervalo, y por lo tanto beneficiará a la degradación de estos.

- Titulación

El hidróxido de bario utilizado para la prueba se estandarizó con biftalato de potasio cada vez que se preparó (Fig.7.51).



Fig.7.51 Estandarización del  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  Fuente: Elaboración propia.





Las concentraciones de las soluciones preparadas de hidróxido de bario se muestran en la tabla 7.27:

Tabla 7.27 Concentración de hidróxido de bario.

Concentración de hidróxido de bario	
Solución A	0.024N
Solución B	0.024N
Solución C	0.024N
Solución D	0.023N
Solución E	0.022N
Solución F	0.024N
Solución G	0.023N
Solución H	0.023N
Solución I	0.024N
Solución J	0.024N
Solución K	0.024N
Solución L	0.024N
Solución M	0.024N
Solución N	0.024N
Solución O	0.024N

Fuente: Elaboración propia.

- Medida de pH

Previo a la titulación se realiza la medición de pH al beaker con hidróxido de bario y al beaker con agua, en las figuras 7.52 y 7.53 se pueden observar los valores graficados de pH para la prueba 1 y las figuras 7.54 y 7.55 para la prueba 2.



### Prueba 1:

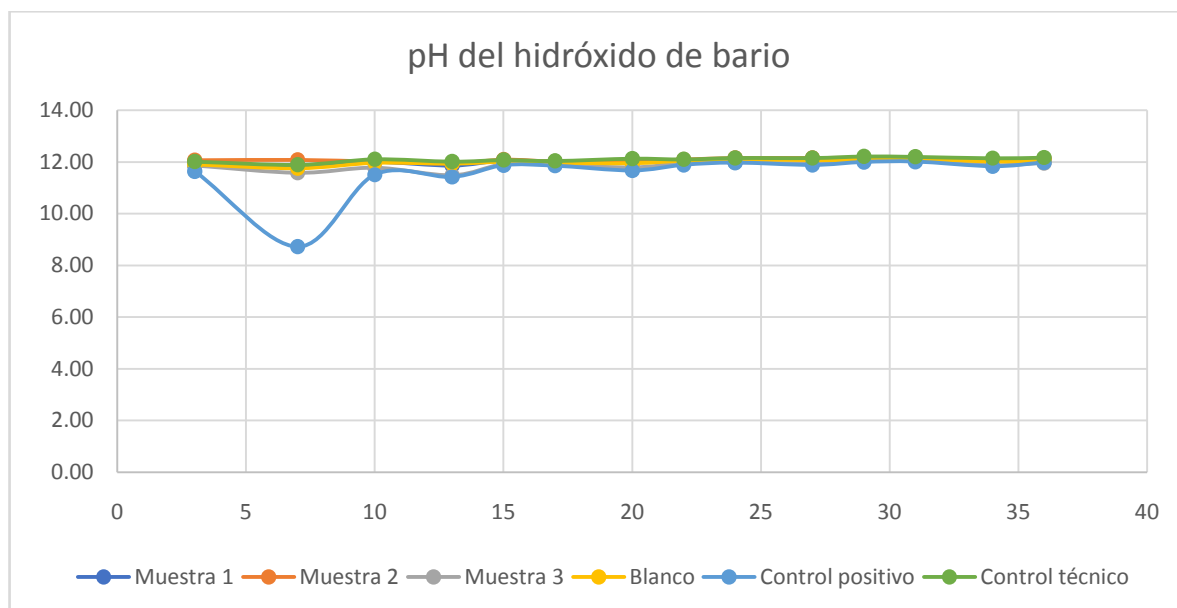


Fig.7.52 Gráfico de pH del  $Ba(OH)_2$  (Muestra 1: Bolsa blanca con oxium, Muestra 2: bolsa blanca con ECM, Muestra 3: bolsa blanca 100% biologic). Fuente: Elaboración propia.

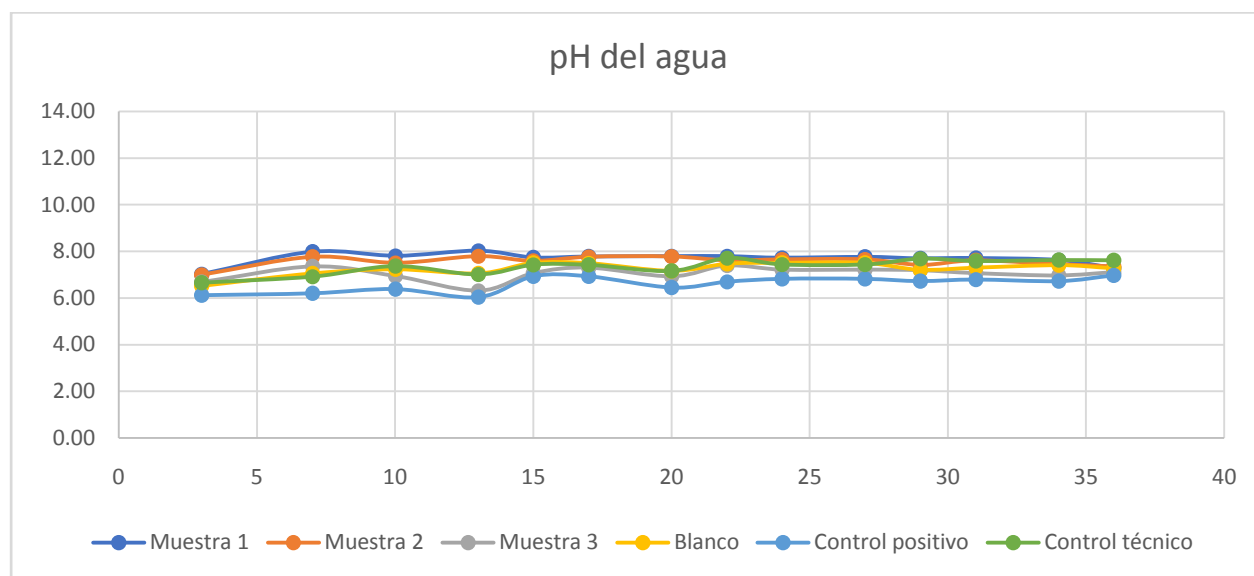


Fig.7.53 Gráfico de pH del agua (Muestra 1: bolsa blanca con oxium, Muestra 2: bolsa blanca con ECM, Muestra 3: bolsa blanca 100% biologic). Fuente: Elaboración propia.



### Prueba 2:

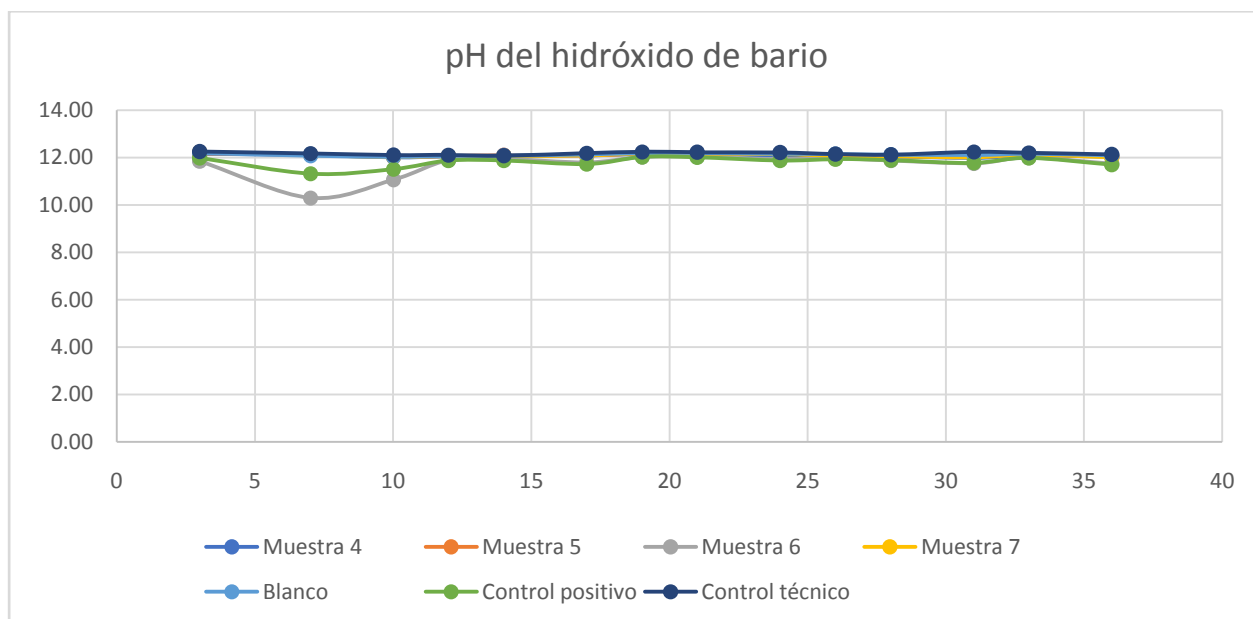


Fig.7.54 Gráfico de pH del  $Ba(OH)_2$  (Muestra 4: bolsa verde con oxium, Muestra 5: bolsa roja con oxium, Muestra 6: bolsa gris de celofan, Muestra 7: bolsa negra con ECM). Fuente: Elaboración propia.

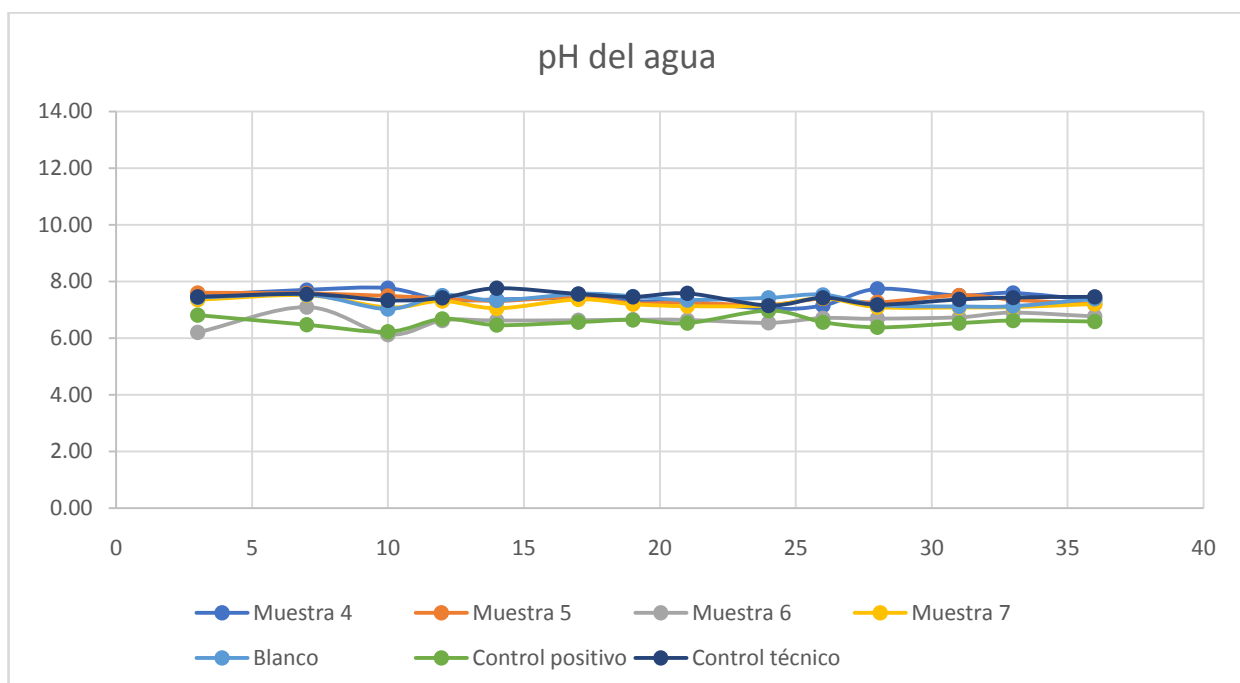


Fig.7.55 Gráfico de pH del agua (Muestra 4: bolsa verde con oxium, Muestra 5: bolsa roja con oxium, Muestra 6: bolsa gris de celofan, Muestra 7: bolsa negra con ECM). Fuente: Elaboración propia.



- Volumen gastado de HCl

Para la prueba es necesario obtener los mililitros de HCl gastados en la titulación del  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  (Fig.7.56), ya que con ello se cuantifica la cantidad de  $\text{CO}_2$  producido.



Fig.7.56 Titulación de la muestra 1 con HCl. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 7.57 y 7.58 se presentan los valores del volumen gastado de HCl para la prueba 1 y 2 respectivamente.

Prueba 1:

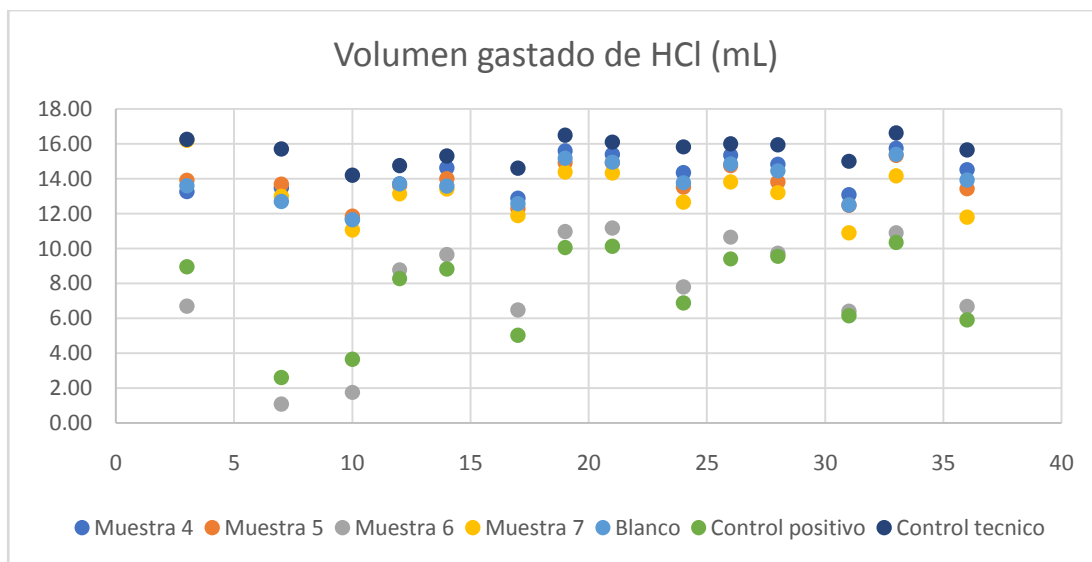


Fig.7.57 Volumen gastado en mL de HCl en la titulación (Muestra 1: bolsa blanca con oxium, Muestra 2: bolsa blanca con ECM, Muestra 3: bolsa blanca 100% biologic). Fuente: Elaboración propia.



Prueba 2:

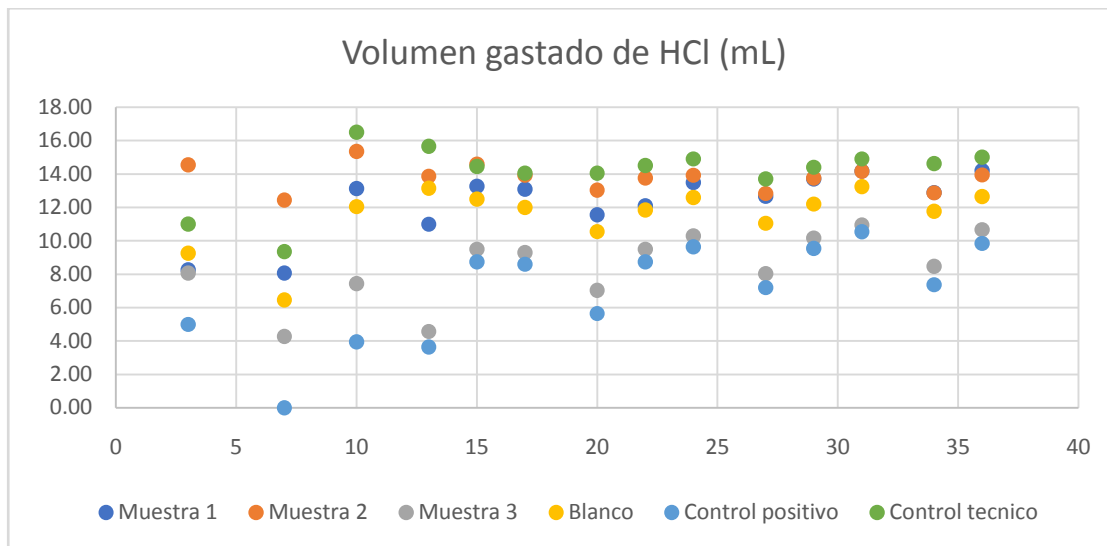


Fig.7.58 Volumen gastado en mL de HCl en la titulación (Muestra 4: bolsa verde con oxium, Muestra 5: bolsa roja con oxium, Muestra 6: bolsa gris de celofan, Muestra 7: bolsa negra con ECM). Fuente: Elaboración propia.

- Cuantificación del CO<sub>2</sub> producido

Antes de pasar a los resultados se describen en la tabla 7.28 las muestras que se analizaron en ambas pruebas:

Tabla 7.28 Descripción de las muestras

	Descripción
Muestra 1	Bolsa blanca con aditivo oxium
Muestra 2	Bolsa blanca con aditivo ECM
Muestra 3	Bolsa blanca 100% biodegradable
Muestra 4	Bolsa verde con aditivo oxium
Muestra 5	Bolsa roja con aditivo oxium
Muestra 6	Bolsa gris de celofán
Muestra 7	Bolsa negra con aditivo ECM
Control Positivo 1	Papel periódico sin impresión
Control Positivo 2	Papel periódico sin impresión

Fuente: Elaboración propia.



Con el fin de obtener los miligramos de dióxido de carbono teóricos, se hace uso de la ecuación siguiente:

$$mg\ CO_2\ teóricos = \frac{44 \times (w\%carb\ on\ o * mg\ de\ la\ muestra)}{12} \quad Ec.7.2$$

Realizando el cálculo se tienen los resultados en la tabla 7.29

Tabla 7.29 Miligramos de dióxido de carbono teóricos

CO <sub>2</sub> teórico	
Muestra 1	6800 mg
Muestra 2	6800 mg
Muestra 3	5200 mg
Muestra 4	6800 mg
Muestra 5	6800 mg
Muestra 6	7040 mg
Muestra 7	6800 mg
Control Positivo 1	3520 mg
Control Positivo 2	3520 mg

Fuente: Elaboración propia.

Luego, para la obtención de los miligramos de CO<sub>2</sub> generados por las muestras y el control positivo, se realiza una resta entre el volumen gastado en el blanco y las muestras. Dicho valor son los mililitros de HCl necesarios para titular el dióxido de carbono generado únicamente del material. Se utiliza la ecuación a continuación para obtener finalmente los miligramos de CO<sub>2</sub> producidos.

$$mg\ de\ CO_2 = \frac{(0.05\ N) \times mL\ HCl \times 44}{2} \quad Ec.7.3$$



Los resultados de este cálculo se encuentran en el gráfico de la masa de CO<sub>2</sub> acumulada para ambas pruebas (figuras 7.59 y 7.60).

### Prueba 1:

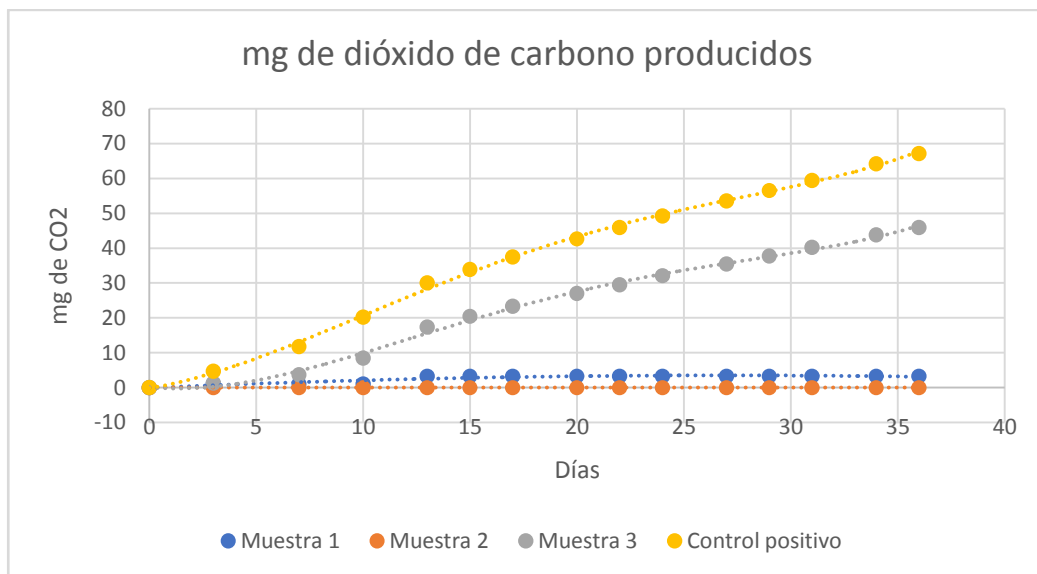


Fig.7.59 Masa del CO<sub>2</sub> acumulada (Muestra 1: bolsa blanca con oxium, Muestra 2: bolsa blanca con ECM, Muestra 3: bolsa blanca 100% biologic). Fuente: Elaboración propia.

### Prueba 2:

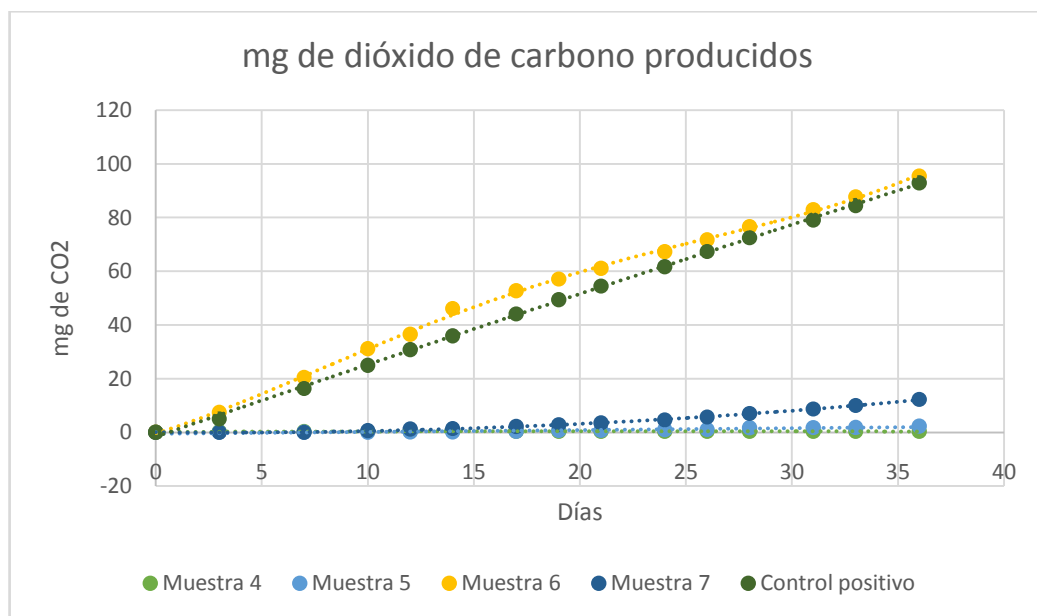


Fig.7.60 Masa del CO<sub>2</sub> acumulada (Muestra 4: bolsa verde con oxium, Muestra 5: bolsa roja con oxium, Muestra 6: bolsa gris de celofan, Muestra 7: bolsa negra con ECM). Fuente: Elaboración propia.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

- Porcentaje de biodegradación de las muestras

Para la obtención del porcentaje de biodegradabilidad del polímero se hace uso de la ecuación siguiente:

$$\%Biodegradabilidad = \frac{mg \text{ de } CO_2 \text{ producido}}{mg \text{ de } CO_2 \text{ teórico}} \times 100 \quad \text{Ec.7.4}$$

A continuación, se presentan los gráficos del porcentaje de biodegradabilidad acumulado en las figuras 7.61 y 7.62.

Prueba 1:

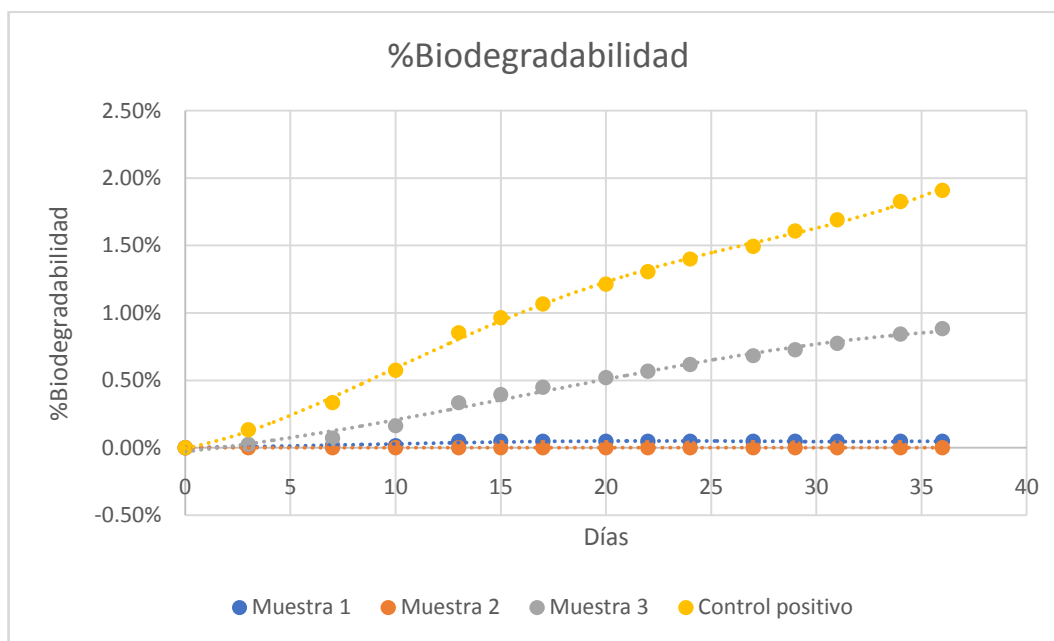


Fig.7.61 Porcentaje acumulado de biodegradabilidad (Muestra 1: bolsa blanca con oxium, Muestra 2: bolsa blanca con ECM, Muestra 3: bolsa blanca 100% biologic). Fuente: Elaboración propia.





## Prueba 2:

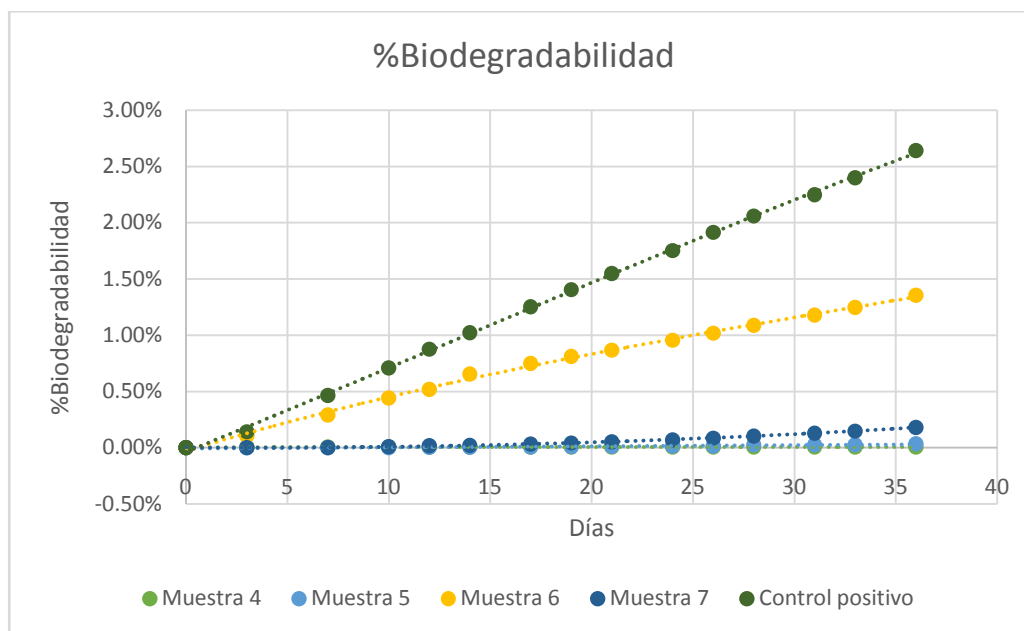


Fig.7.62 Porcentaje acumulado de biodegradabilidad Muestra 4: bolsa verde con oxium, Muestra 5: bolsa roja con oxium, Muestra 6: bolsa gris de celofan, Muestra 7: bolsa negra con ECM). Fuente: Elaboración propia.

## 7.2 Resultados fase 2

A continuación se detallan los resultados de las muestras analizadas en la fase 2.

### 7.2.1 Resultados degradación oxidativa

Las muestras 4 y 8 se subdividieron respectivamente en diferentes procesos como se observa en la figura 7.1. Antes de pasar a una fase de degradación biológica se realizaron diferentes métodos de degradación oxidativa (mencionados en la metodología) a una cantidad de probetas (5 por método). En el primer método las probetas fueron sometidas a temperaturas de 45 °C durante 1 mes y 2 meses dependiendo del proceso establecido. En la figura 7.63 se puede observar la disposición final en hornos, donde se buscó que el calor sea transmitido en todas las direcciones de la probeta.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”



Figura 7.63 Disposición de muestras en proceso de oxidación térmica a 45 °C.

Para el segundo método se procedió a colocar las probetas en una cámara de radiación UV. El periodo de exposición fue de 10 días y en la figura 7.64 se puede observar el montaje de las muestras y la exposición a rayos UV.



Figura 7.64 Disposición de las muestras en la cámara UV (izquierda), muestras sometidas a radiación ultravioleta (derecha)

El tercer método consistió en exposición de las probetas a radiación ultravioleta proveniente de los rayos solares además de exposición a condiciones abiertas. El periodo de exposición fue de 25 días. En la figura 7.65 se observa el inicio y final del periodo de exposición.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”



Figura 7.65 Inicio de la prueba de exposición solar (izquierda) final de la prueba de exposición solar (derecha).

Luego de los procesos de degradación oxidativa se midió el porcentaje de elongación de las muestras para comprobar si lograron alcanzar el punto de interés de 5% de elongación o menos. Los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 7.30 y 7.31.

Tabla 7.30. Resultados del análisis de tensión de la muestra 4.

		ID	Sin proceso	UV+ horno 45°C	UV sin horno	Sol+ horno 45°	Sol	2 meses en horno
Muestra 4	Carga Máxima MD (gf)	1	2351.57	2303.51	2506.07	907.61	996.29	2446.17
		2	1924.82	2374.24	2598.69	988.35	988.57	2043.28
		3	1669.75	2130.48	2338.48	978.52	935.53	2257.53
		4	2069.03	2181.67	2220.4	1009.43	951.76	2088.75
		5	-	2449.94	2192.38	826.13	978.89	1833.03
		<b>Promedio</b>	<b>2003.79</b>	<b>2287.97</b>	<b>2371.2</b>	<b>942.01</b>	<b>970.21</b>	<b>2133.75</b>
	% de Elongación MD	1	374.08	367.52	398.69	1514.18	32.88	382.29
		2	337.99	393.76	385.56	119.81	32.87	357.68
		3	334.71	362.6	387.21	96.85	44.36	410.17
		4	374.08	397.05	365.88	44.36	47.64	424.93
		5	-	403.61	385.56	101.64	388.85	328.15
<b>Promedio</b>		<b>355.22</b>	<b>384.91</b>	<b>384.58</b>	<b>375.37</b>	<b>109.32</b>	<b>380.64</b>	

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 7.31. Resultados del análisis de tensión de la muestra 8.

		ID	Sin Proceso	UV+ horno 45°C	UV sin horno	Sol+ horno 45°	Sol	2 meses en horno
Muestra 8	Carga Máxima MD (gf)	1	4559.14	4257.9	4356.85	3266.71	3555.68	4414.4
		2	4563.17	4774.4	4437.77	3352.64	3257.52	4408.17
		3	4929.8	4657.09	4673.05	3323.61	3279.09	4367.29
		4	3586.55	4336.83	4618.11	3502.21	3455.27	4413.46
		5	-	4115.78	4089.19	2584.98	2967.7	4643.56
		<b>Promedio</b>	<b>4409.67</b>	<b>4428.40</b>	<b>4434.99</b>	<b>3206.03</b>	<b>3303.05</b>	<b>4449.38</b>
	% de Elongación MD	1	812.07	731.69	772.7	674.28	680.84	785.83
		2	792.38	733.33	772.7	646.39	670.99	771.06
		3	794.03	794.03	785.83	607.02	670.99	743.18
		4	557.81	774.34	813.71	649.67	677.56	743.18
		5	-	749.74	753.02	351.12	621.79	772.7
<b>Promedio</b>		<b>739.07</b>	<b>756.63</b>	<b>779.59</b>	<b>585.70</b>	<b>664.43</b>	<b>763.19</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Para la muestra 4 se logra observar una disminución en los procesos donde se involucra la exposición a la luz solar. La carga máxima de tensión disminuye en las muestras sometidas a sol y a sol+ horno 45 °C, pero el % de elongación disminuye drásticamente solamente en la muestra sometida a sol. Como se puede observar en la figura 7.66, la muestra 4 no logra llegar al % de elongación establecido por la norma por lo que los métodos establecidos no degradan lo suficiente a la muestra 4.

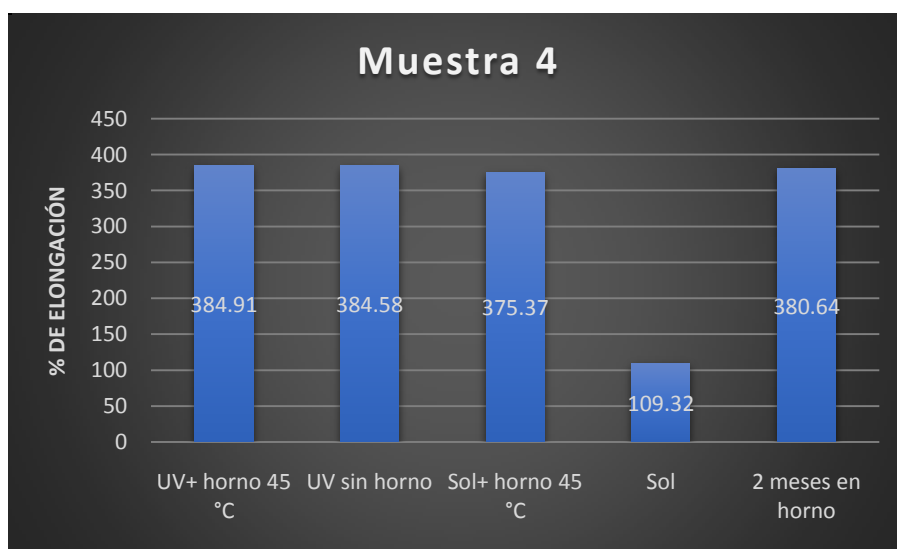


Figura 7.66 Gráfica del % de elongación para la muestra 4 y los diferentes procesos de oxidación



Para la muestra 8 se logra observar una pequeña disminución en los procesos donde se involucra la exposición a la luz solar. La carga máxima de tensión disminuye en las muestras sometidas a sol y a sol+ horno 45 °C. En este caso el % de elongación disminuye un poco solamente en la muestra sometida a sol+ horno 45 °C. Como se puede observar en la figura 7.67, la muestra 8 no logró alcanzar el % de elongación establecido por la norma por lo que los métodos establecidos no degradan lo suficiente a la muestra 8.

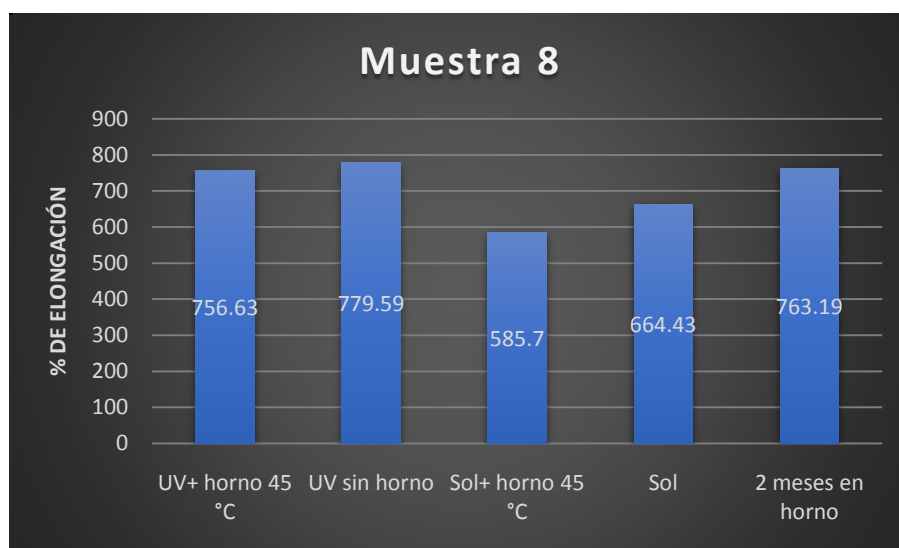


Figura 7.67 Gráfica del % de elongación para la muestra 8 y los diferentes procesos de oxidación

## 7.2.2 Prueba de biodegradabilidad

### 7.2.2.1 Caracterización del suelo

- Contenido de Humedad

La muestra de suelo se tamizó y luego se pesaron 50 g en cada una de las cápsulas de porcelana previamente secadas. Las muestras de suelo pasaron en el horno alrededor de 16 horas a 105°C. Luego se colocaron una hora al desecador y por último se pesaron nuevamente.

Se utilizó la ecuación 6.1 para poder obtener los resultados de humedad que se muestran en la tabla 7.32



Tabla 7.32 Contenido de humedad del suelo

Contenido de Humedad	
#1	10.46%
#2	11.80%
#3	12.33%
#4	12.02%
#5	11.39%
$\bar{X}$	11.60%

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos anteriores se obtiene la media correspondiente a 11.60% para la prueba de humedad, lo cual se podría considerar un dato normal para la muestra de suelo.

- Contenido de Ceniza

Para la prueba, se utilizaron 4 cápsulas con suelo seco (utilizadas para la prueba de contenido de humedad) y se colocaron en la mufla a 440°C por una hora. Al enfriarse (60°C como mínimo), se colocaron en el desecador por 50 min y luego se pesaron.

Utilizando la ecuación 6.2 se obtuvieron los resultados de ceniza para ambas pruebas (tabla 7.33).

Tabla 7.33 Contenido de ceniza en el suelo

Contenido de Ceniza	
#1	93.72%
#2	93.61%
#3	93.69%
#4	93.75%
$\bar{X}$	93.69%

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos anteriores se obtiene la media correspondiente a 93.69% para la prueba de ceniza.



- Material orgánico

Para obtener el contenido orgánico se utiliza la ecuación 6.3, obteniendo los resultados de la tabla 7.34:

Tabla 7.34 Contenido de material orgánico del suelo

Contenido de MO	
#1	6.28%
#2	6.39%
#3	6.31%
#4	6.25%
$\bar{X}$	6.31%

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos anteriores se obtiene la media correspondiente a 6.31% para la prueba de material orgánico.

- Determinación de pH en suelo

Para la prueba de pH se colocaron 10g de suelo seco en 6 beakers, en los cuales tres se diluyeron con 30 mL de solución de cloruro de calcio 0.01M y los tres restantes en 30mL de agua destilada. En cada toma se procuró esperar al menos 5 segundos luego de que el valor estabilizara. Los resultados de la prueba se muestran en las tablas 7.35 y 7.36:

Tabla 7.35 pH del suelo en cloruro de calcio.

pH de suelo (en CaCl <sub>2</sub> )	
#1	4.95
#2	4.97
#3	4.98
$\bar{X}$	4.97

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 7.36 pH del suelo en agua

pH de suelo (en agua)	
#1	5.22
#2	5.26
#3	5.26
$\bar{X}$	5.25

Fuente: Elaboración propia.

- Determinación del contenido de nitrógeno

Es importante calcular la normalidad del dicromato de potasio con el peso real, el cual fue de 2.4517g para 50mL de solución, dando como resultado una concentración de 1.0001N.

Al llegar al punto de viraje (verde brillante) se obtuvieron los mililitros gastados de sulfato de hierro, los cuales se muestran a continuación en la tabla 7.37 tanto para muestras como para blancos.

Tabla 7.37 volumen de sulfato de hierro gastado.

Volumen gastado de sulfato de hierro	
R1	19.0mL
R2	18.8mL
B1	19.9mL
B2	19.8mL

Fuente: Elaboración propia.

Con los mililitros gastados por el blanco, se puede conocer la normalidad del titulante (sulfato de hierro), presentada en la tabla 7.38:





Tabla 7.38 pH Concentración del titulante.

Concentración del FeSO <sub>4</sub>	
B1	0.5026N
B2	0.5051N
$\bar{X}$	0.5038N

Fuente: Elaboración propia.

Luego se puede obtener el porcentaje de carbono de cada una de las réplicas utilizando la ecuación 7.4.

Dando los resultados de la tabla 7.39:

Tabla 7.39 Porcentaje de carbono en muestra de suelo

%C en muestras	
R1	1.67%
R2	2.06%
$\bar{X}$	1.86%

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos anteriores, se calcula el material orgánico para luego obtener el contenido de nitrógeno del suelo, como se muestra en la tabla 7.40.

Tabla 7.40 Porcentaje de nitrógeno en muestra de suelo

%N en muestras	
R1	0.1432%
R2	0.1771%
$\bar{X}$	0.1601%

Fuente: Elaboración propia.



### 7.2.2.2 Resultados de biodegradabilidad

Para la prueba de biodegradabilidad se comenzó con 4 muestras y una semana después se agregaron 3 muestras más, por lo cual la sección de resultados está dividida en dos partes, ya que para cada ensayo se cuentan los días desde la primera vez que se colocan.

- Relación C/N

Con el fin de cumplir la relación carbono/nitrógeno de 10:1-20:1, fue necesario obtener el porcentaje de carbono por gramo de muestra, los cuales se muestran en la tabla 7.41:

Tabla 7.41 Porcentaje de carbono en muestra de polímero.

Descripción	Material	Pretratamiento	%C en muestra
Muestra 8	Polietileno + Oxium	-	85%
Muestra 9	Polietileno + Oxium	Horno *	85%
Muestra 10	Polietileno + P-life	Horno	85%
Muestra 11	Polietileno + Oxium	Horno-Sol *	85%
Muestra 12	Polietileno + P-life	Horno-Sol	85%
Muestra 13	Polietileno + Oxium	Horno-UV *	85%
Muestra 14	Polietileno + P-life	Horno-UV	85%
Control Positivo 1	Celulosa	-	44%
Control Positivo 2	Celulosa	-	44%

Condiciones: Horno: 45°C. Sol: 10 horas de luz solar (aproximadamente). UV: 340 nm. Fuente: Elaboración propia.

Conociendo la cantidad de muestra, la cantidad de suelo (200 g) y los %C de la tabla 1.10 se obtiene la relación C/N utilizando el valor obtenido de nitrógeno de suelo (0.16%) como base.

Los resultados se observan en la tabla 7.42:



Tabla 7.42 Relación C/N

Descripción	Cantidad de muestra	Relación C/N en el sistema
Muestra 8	4g	10.60
Muestra 9	4g	10.60
Muestra 10	4g	10.60
Muestra 11	4g	10.60
Muestra 12	4g	10.60
Muestra 13	4g	10.60
Muestra 14	4g	10.60
Control Positivo 1	7.7g	10.58
Control Positivo 2	7.7g	10.58

Fuente: Elaboración propia.

Considerando que los valores deseados de la relación carbono-nitrógeno son de 10-20 podemos observar que todos cumplen con este intervalo, y por lo tanto beneficiará a la degradación de estos.

- Titulación

El hidróxido de bario utilizado para la prueba se estandarizó con biftalato de potasio cada vez que se preparó. Las concentraciones de las soluciones preparadas de hidróxido de bario se muestran en la siguiente tabla 7.43:

Tabla 7.43 Concentración de hidróxido de bario.

Concentración de hidróxido de bario	
Solución A	0.023N
Solución B	0.023N
Solución C	0.023N
Solución D	0.024N
Solución E	0.024N



Solución F	0.023N
Solución G	0.024N
Solución H	0.024N
Solución I	0.024N
Solución J	0.024N
Solución K	0.025N
Solución L	0.024N
Solución M	0.024N

Fuente: Elaboración propia.

- Medida de pH

Previo a la titulación se realiza la medición de pH al beaker con hidróxido de bario y al beaker con agua, en las figuras 7.68 y 7.69 se pueden observar los valores graficados de pH para la prueba 1 y las figuras 7.70 y 7.71 para la prueba 2.

Prueba 1:

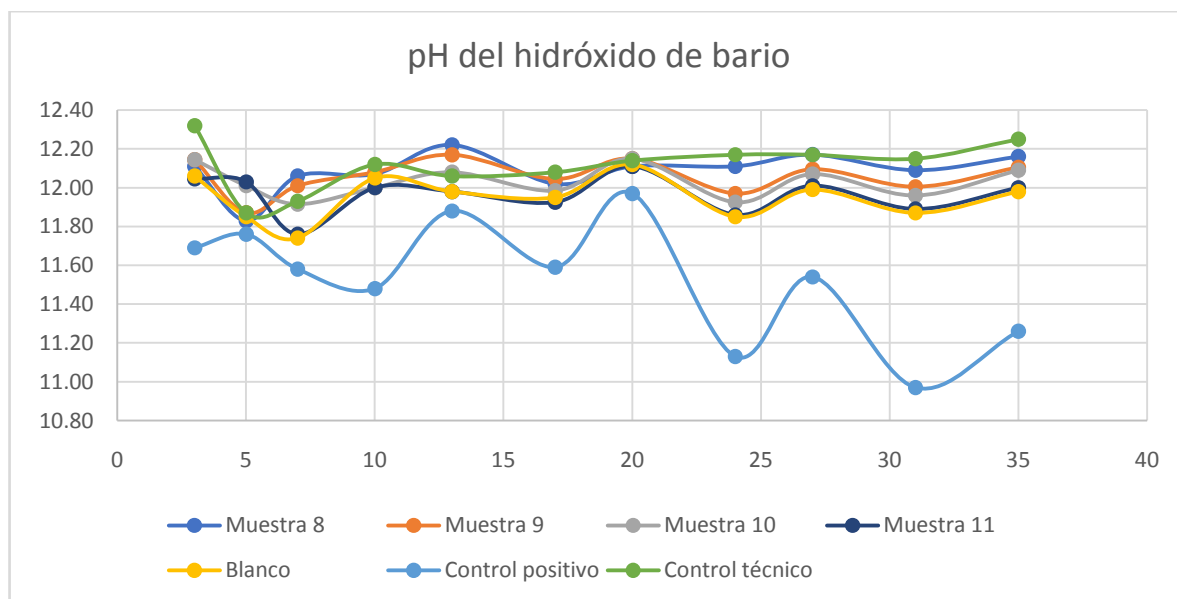


Fig.7.68 Gráfico de pH del  $Ba(OH)_2$  (Muestra 8: bolsa verde con oxium, muestra 2: bolsa verde con oxium (horno) muestra 10: bolsa blanca p-life (horno), muestra 11: bolsa verde con oxium (horno-sol). Fuente: Elaboración propia.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

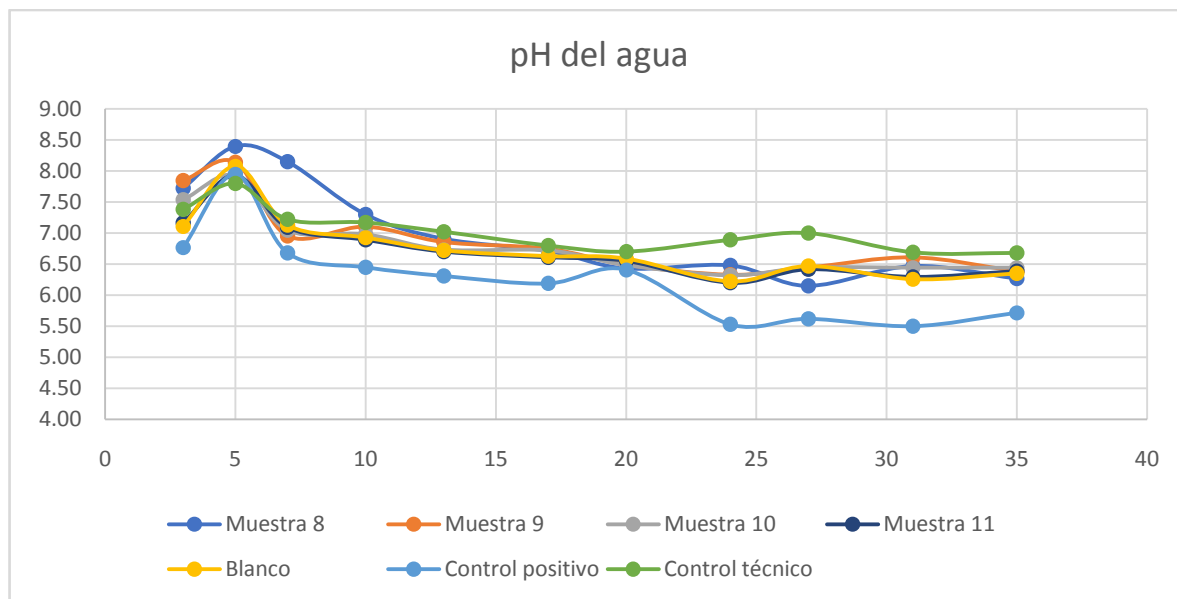


Fig.7.69 Gráfico de pH del agua (Muestra 8: bolsa verde con oxium, muestra 2: bolsa verde con oxium (horno) muestra 10: bolsa blanca p-life (horno), muestra 11: bolsa verde con oxium (horno-sol). Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

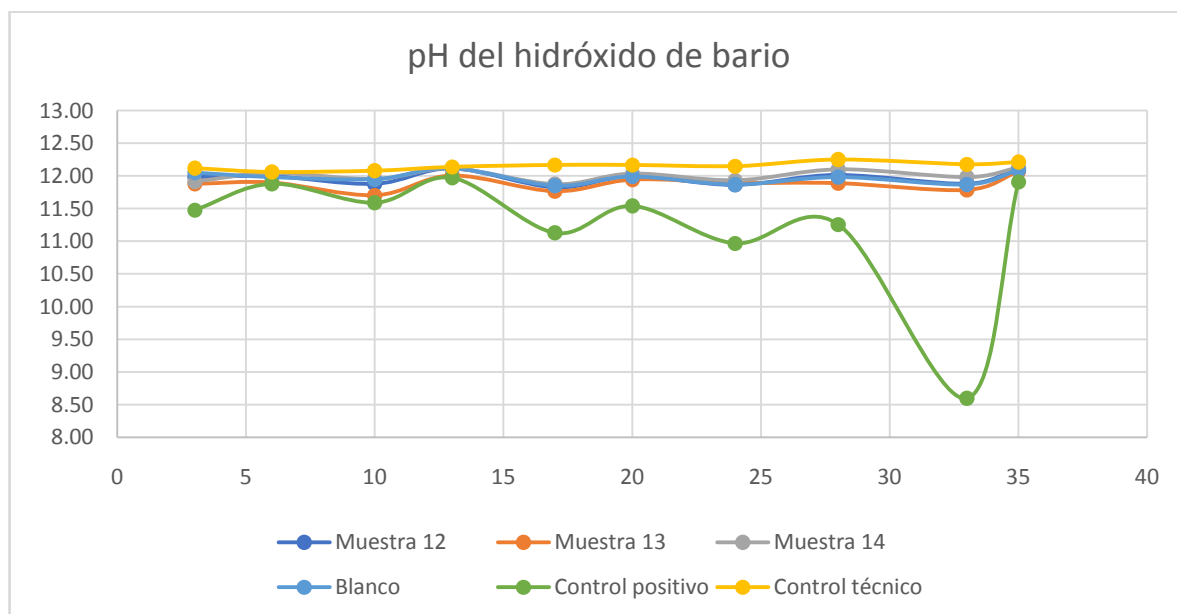


Fig.7.70 Gráfico de pH del Ba(OH)<sub>2</sub> (Muestra 12: bolsa blanca con p-life (horno-sol), muestra 13: bolsa verde con oxium (horno-UV), muestra 6: bolsa blanca con p-life (horno-UV) Fuente: Elaboración propia.

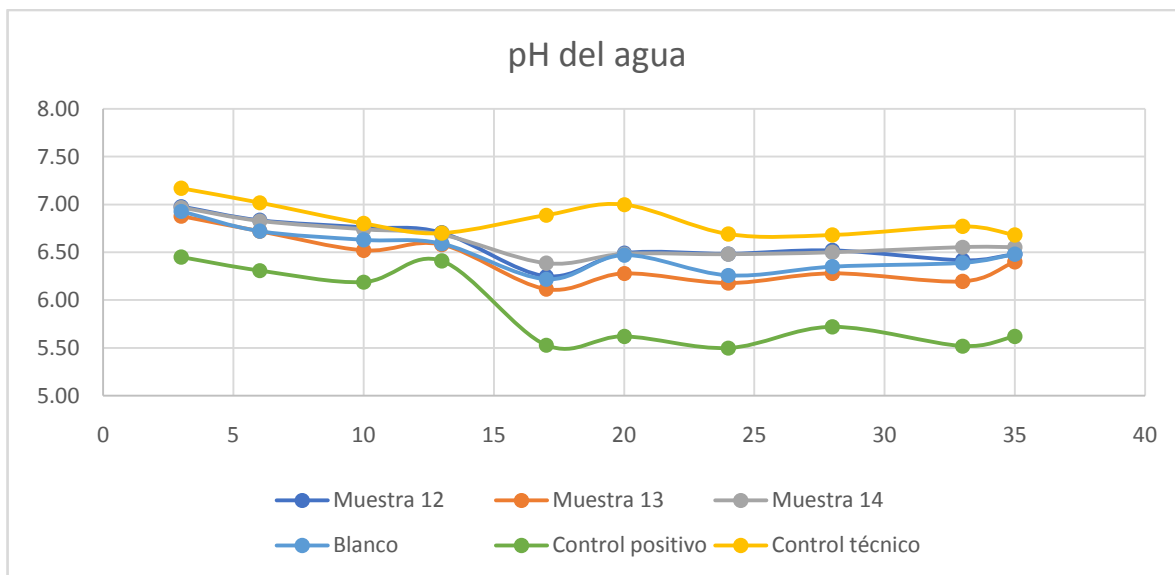


Fig.7.71 Gráfico de pH del agua (Muestra 12: bolsa blanca con p-life (horno-sol), muestra 13: bolsa verde con oxium (horno-UV), muestra 6: bolsa blanca con p-life (horno-UV) Fuente: Elaboración propia.

- Volumen gastado de HCl

Para la prueba es necesario obtener los mililitros de HCl gastados en la titulación del  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , ya que con ello se cuantifica la cantidad de  $\text{CO}_2$  producido.

En las figuras 7.72 y 7.73 se presentan los valores del volumen gastado de HCl para la prueba 1 y 2 respectivamente.



### Prueba 1:

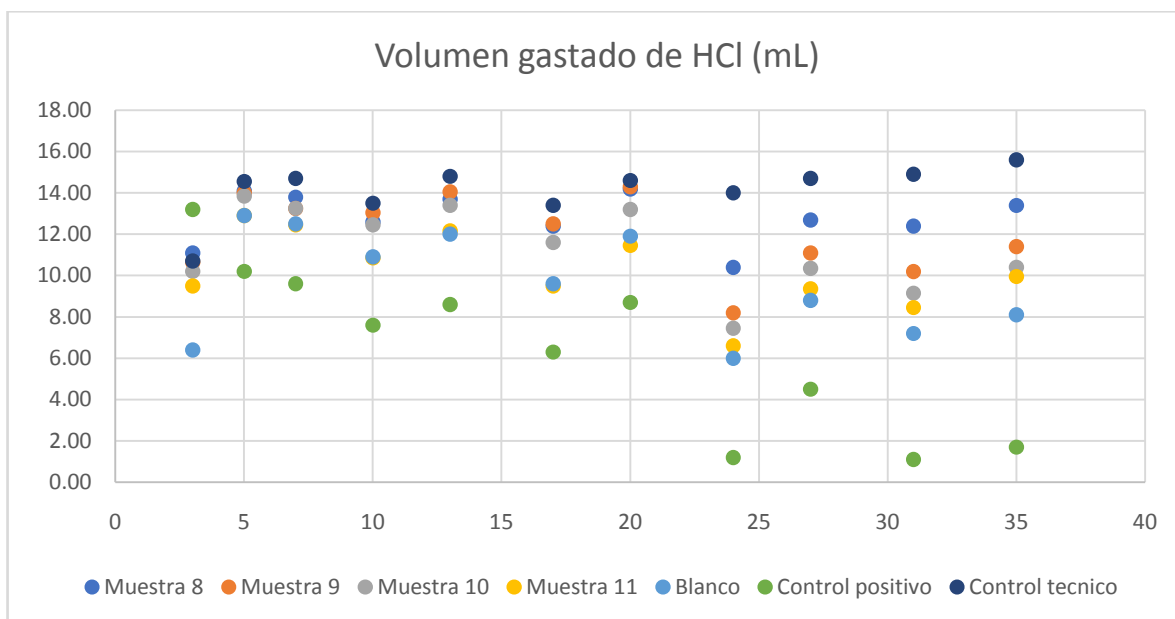


Fig.7.72 Volumen gastado en mL de HCl en la titulación (Muestra 8: bolsa verde con oxium, muestra 2: bolsa verde con oxium (horno) muestra 10: bolsa blanca p-life (horno), muestra 11: bolsa verde con oxium (horno-sol). Fuente: Elaboración propia.

### Prueba 2:

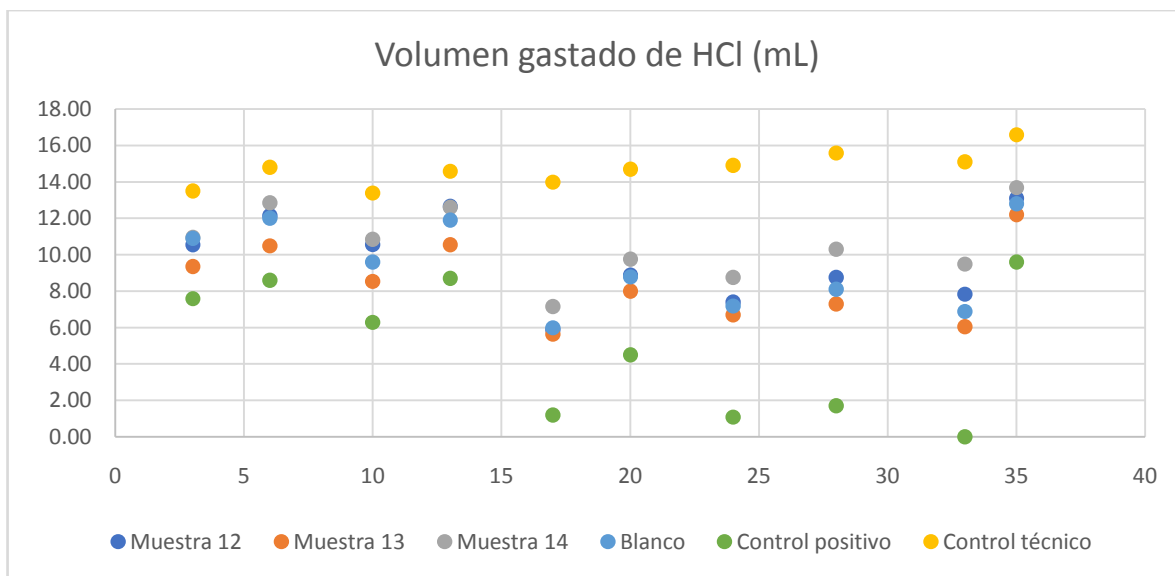


Fig.7.73 Volumen gastado en mL de HCl en la titulación (Muestra 12: bolsa blanca con p-life (horno-sol), muestra 13: bolsa verde con oxium (horno-UV), muestra 6: bolsa blanca con p-life (horno-UV) Fuente: Elaboración propia.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

- Cuantificación del CO<sub>2</sub> producido

Antes de pasar a los resultados se describen nuevamente las muestras que se analizaron en ambas pruebas:

Tabla 7.44 Descripción de las muestras

	Descripción	Pretratamiento
Muestra 8	Bolsa verde con aditivo oxium	-
Muestra 9	Bolsa verde con aditivo oxium	Horno
Muestra 10	Bolsa blanca con aditivo p-life	Horno
Muestra 11	Bolsa verde con aditivo oxium	Horno-Sol
Muestra 12	Bolsa blanca con aditivo p-life	Horno-Sol
Muestra 13	Bolsa verde con aditivo oxium	Horno-UV
Muestra 14	Bolsa blanca con aditivo p-life	Horno-UV
Control Positivo	Papel periódico sin impresión	-

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de obtener los miligramos de dióxido de carbono teóricos, se hace uso de la ecuación 7.2. Realizando el cálculo se tienen los resultados a continuación:

Tabla 7.45 Miligramos de dióxido de carbono teóricos

CO <sub>2</sub> teórico	
Muestra 8	6545 mg
Muestra 9	6545 mg
Muestra 10	6545 mg
Muestra 11	6545 mg
Muestra 12	6545 mg
Muestra 13	6545 mg
Muestra 14	6545 mg
Control Positivo 1	1760 mg

Fuente: Elaboración propia.





Luego, para la obtención de los miligramos de CO<sub>2</sub> generados por las muestras y el control positivo, se realiza una resta entre el volumen gastado en el blanco y las muestras. Dicho valor son los mililitros de HCl necesarios para titular el dióxido de carbono generado únicamente del material. Se utiliza la ecuación 7.3 para obtener finalmente los miligramos de CO<sub>2</sub> producidos.

Los resultados de este cálculo se encuentran en el gráfico de la masa de CO<sub>2</sub> acumulada para ambas pruebas (figuras 7.74 y 7.75).

Prueba 1:

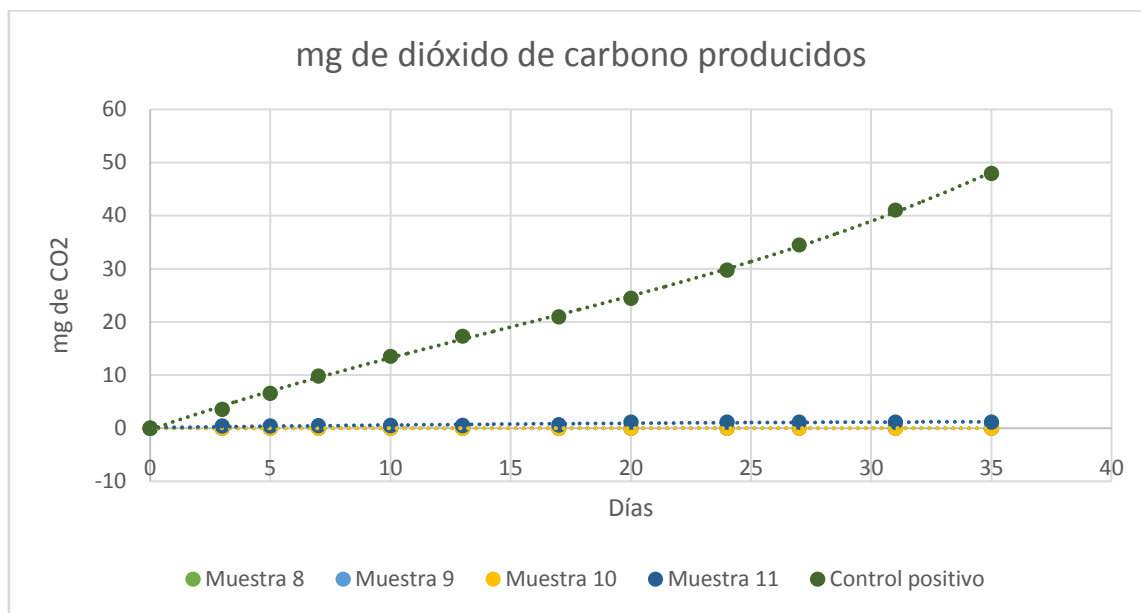


Fig.7.74 Masa del CO<sub>2</sub> acumulada (Muestra 8: bolsa verde con oxium, muestra 2: bolsa verde con oxium (horno) muestra 10: bolsa blanca p-life (horno), muestra 11: bolsa verde con oxium (horno-sol). Fuente: Elaboración propia.



### Prueba 2:

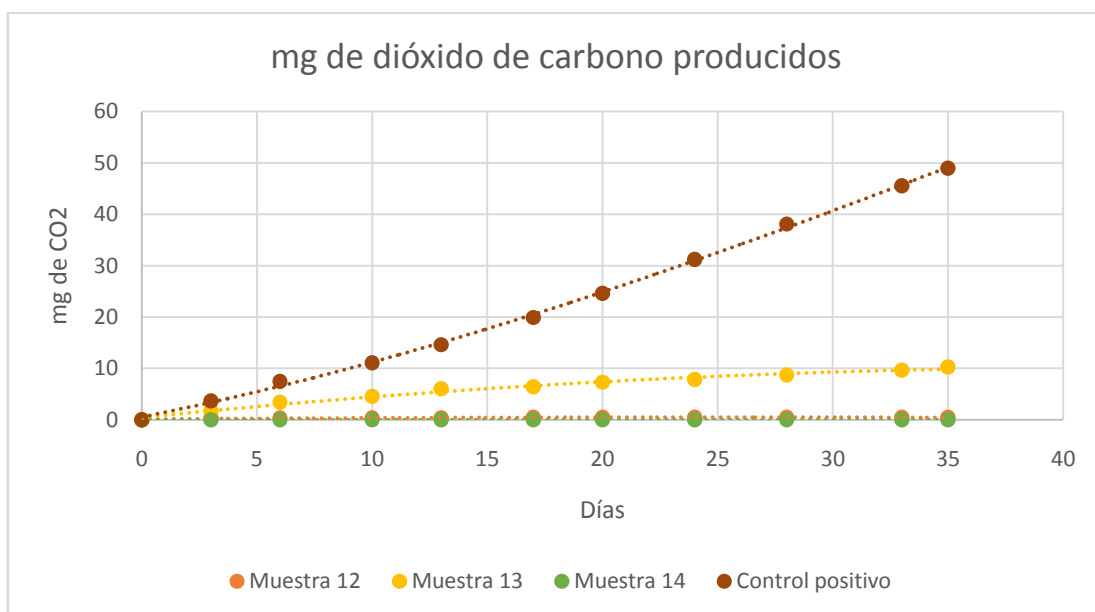


Fig.7.75 Masa del CO<sub>2</sub> acumulada (Muestra 12: bolsa blanca con p-life (horno-sol), muestra 13: bolsa verde con oxium (horno-UV), muestra 6: bolsa blanca con p-life (horno-UV) Fuente: Elaboración propia

- Porcentaje de biodegradación de las muestras

Para la obtención del porcentaje de biodegradabilidad del polímero se hace uso de la ecuación 7.4. A continuación, se presentan los gráficos del porcentaje de biodegradabilidad acumulado.



Prueba 1:

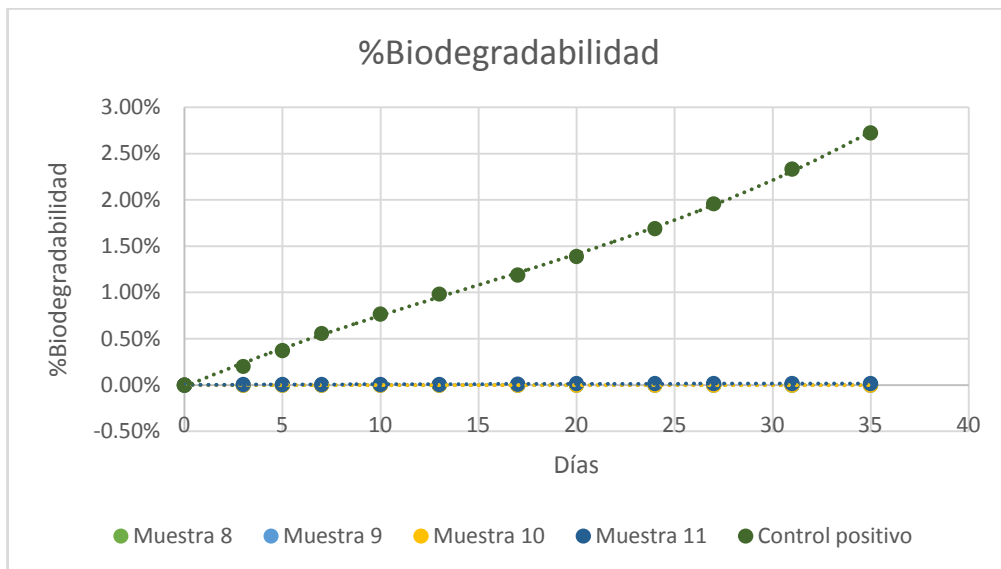


Fig.7.76 Porcentaje acumulado de biodegradabilidad (Muestra 8: bolsa verde con oxium, muestra 2: bolsa verde con oxium (horno) muestra 10: bolsa blanca p-life (horno), muestra 11: bolsa verde con oxium (horno-sol). Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

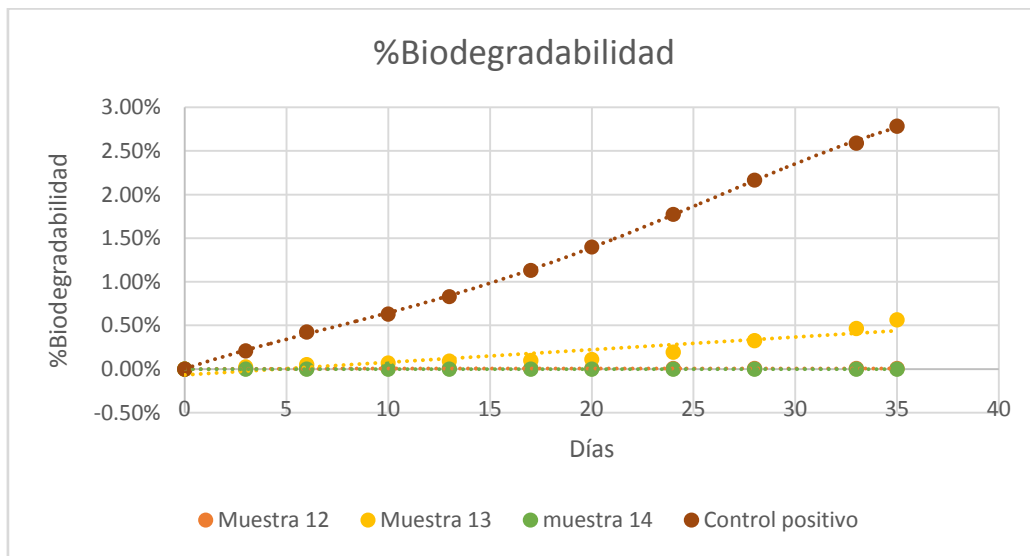


Fig.7.77 Porcentaje acumulado de biodegradabilidad (Muestra 12: bolsa blanca con p-life (horno-sol), muestra 13: bolsa verde con oxium (horno-UV), muestra 6: bolsa blanca con p-life (horno-UV) Fuente: Elaboración propia.



En las tablas 7.46 y 7.47 se coloca el % total de biodegradabilidad alcanzando por cada muestra y su respectivo control positivo, obtenido en cada una de las fases, respectivamente.

Tabla 7.46 Porcentaje total de biodegradabilidad alcanzada en cada muestra y los controles positivos a los 36 días

Muestra	Porcentaje total de biodegradación
Muestra 1	0.05 %
Muestra 2	0.00 %
Muestra 3	0.88 %
Muestra 4	0.01 %
Muestra 5	0.03 %
Muestra 6	1.36 %
Muestra 7	0.18 %
Control positivo 1	1.91 %
Control positivo 2	2.64 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.47 Porcentaje total de biodegradabilidad alcanzada en cada muestra y los controles positivos a los 35 días

Muestra	Porcentaje total de biodegradación
Muestra 8	0.00 %
Muestra 9	0.00 %
Muestra 10	0.00 %
Muestra 11	0.02 %
Muestra 12	0.01 %
Muestra 13	0.56 %
Muestra 14	0.00 %
Control positivo 1	2.73 %
Control positivo 2	2.79 %

Fuente: Elaboración propia



## 8 CONCLUSIONES

En los ensayos sin pre-tratamiento se observó que en 36 días el control positivo (papel periódico sin impresión) alcanzó un promedio de aproximado de 2.28 % de biodegradabilidad. Las muestras 3 (Biologic) y 6 (celofán) presentan un porcentaje de biodegradabilidad de 0.88% y 1.36 % respectivamente, que al comparar con el control positivo estaría alcanzado valores entre 38.5% y 59.6% del porcentaje de biodegradabilidad alcanzado por este. El resto de muestras, todas fabricadas de polímeros de polietileno aditivadas, no presentaron en este período de tiempo, valores significativos de biodegradabilidad, oscilando los valores entre 0.00% y 0.18%. Por lo que una resina plástica convencional con aditivos no presenta bajo estas condiciones el mismo comportamiento o biodegradabilidad que un bioplástico biodegradable.

Las resinas plásticas convencionales con aditivos sometidas a un pre-tratamiento térmico en horno a 45°C por 60 días, previo a la prueba de biodegradabilidad, no muestran indicios de biodegradación y su comportamiento es comparable al ensayo sin tratamiento. Por lo que este período de inducción térmica no es suficiente para que en un lapso de 36 días se observe el inicio de biodegradabilidad, comparado con el control positivo que alcanzó en este período un 2.76% de biodegradabilidad.

Las resinas plásticas convencionales con aditivos sometidas a un pre-tratamiento térmico combinado, primero horno a 45°C por 60 días y luego exposición al sol por 24 días, no presentan indicios de biodegradabilidad en los 36 días de la prueba de biodegradabilidad.. Este tipo de inducción térmica tampoco es suficiente para que en 36 días se observe el inicio de biodegradabilidad, comparado con el control positivo que alcanzó en este período un 2.76% de biodegradabilidad.

Las resinas plásticas convencionales con aditivos sometidas a un pre-tratamiento térmico combinado, primero horno a 45°C por 60 días y luego exposición a radiación UV ( $\lambda=240\text{nm}$ ), tienen un comportamiento diferente dependiendo el aditivo. La resina con aditivo P-life no presentan indicios de biodegradabilidad en los 36 días de la prueba de biodegradabilidad.



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

En cambio la resina con aditivo Oxium, presenta un porcentaje de 0.56% de biodegradabilidad en el período del experimento, lo que representa un 20.28% contra el control positivo (2.76% de biodegradabilidad).



## 9 **BIBLIOGRAFÍA**

Abdelmoez, Wael, Islam Dahab, Esraa M. Ragab, Omnia A. Abdelsalam, and Ahmad Mustafa. 2021. "Bio- and Oxo-Degradable Plastics: Insights on Facts and Challenges." *Polymers for Advanced Technologies* 32 (5): 1981-1996. doi:10.1002/pat.5253.

<https://doi.org/10.1002/pat.5253>.

ASTM D2974-20

*Standard Test Methods for Determining the Water (Moisture) Content, Ash Content, and Organic Material of Peat and Other Organic Soils*, (2020): .

ASTM D3826 - 18

*Standard Practice for Determining Degradation End Point in Degradable Polyethylene and Polypropylene using a Tensile Test* , (2018): .

ASTM D5988-18

*Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil*, (2018a): .

ASTM D6400-19: *Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal Or Industrial Facilities*, (2019): .

ASTM D6954-18

*Standard Guide for Exposing and Testing Plastics that Degrade in the Environment by A Combination of Oxidation and Biodegradation*, (2018b): .

D-3418 *Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry*. (2015): .

Barraza, Enrique. 2017. "Medición De La Cantidad De Residuos Plásticos Pequeños En Algunas Playas De El Salvador." 17 (45): 45-54. doi:<https://doi.org/10.5377/ryr.v0i45.4421>.

European Bioplastics. 2015. *Oxo-Biodegradable” Plastics and Other Plastics with Additives for Degradation*.

Fontanella, Stéphane, Sylvie Bonhomme, Jean-Michel Brusson, Silvio Pitteri, Guy Samuel, Gérard Pichon, Jacques Lacoste, Dominique Fromageot, Jacques Lemaire, and Anne-Marie Delort. 2013. "Comparison of Biodegradability of various Polypropylene Films Containing Pro-Oxidant Additives Based on Mn, Mn/Fe Or Co." *Polymer Degradation and Stability* 98 (4): 875-884. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2013.01.002.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391013000049>.

ISO 11357-1 *Calorimetría Diferencial De Barrido (DSC). Parte 1: Principios Generales*. , (2015): .



“Determinación de la biodegradabilidad de productos plásticos de un solo uso utilizados en El Salvador, elaborados a base de resinas con aditivos y/o resinas biobasadas”

MARN. 2006. *Estudio Sobre El Mercado Potencial Del Reciclaje En El Salvador*. San Salvador.

OECD. 2022. *Plastics use in 2019*. doi:10.1787/efff24eb-en. <https://www.oecd-ilibrary.org/content/data/efff24eb-en>.

Roy, Prasun K., Minna Hakkarainen, Indra K. Varma, and Ann-Christine Albertsson. 2011. "Degradable Polyethylene: Fantasy Or Reality." *Environmental Science & Technology* 45 (10): 4217-4227. doi:10.1021/es104042f. <https://doi.org/10.1021/es104042f>.

Sheldon, Roger A. and Michael Norton. 2020. "Green Chemistry and the Plastic Pollution Challenge: Towards a Circular Economy." *Green Chemistry* 22 (19): 6310-6322. doi:10.1039/D0GC02630A. <http://dx.doi.org/10.1039/D0GC02630A>.

Syberg, Kristian, Maria Bille Nielsen, Lauge Peter Westergaard Clausen, Geert van Calster, Annemarie van Wezel, Chelsea Rochman, Albert A. Koelmans, Richard Cronin, Sabine Pahl, and Steffen Foss Hansen. 2021. "Regulation of Plastic from a Circular Economy Perspective." *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 29: 100462. doi:10.1016/j.cogsc.2021.100462. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223621000183>.

Valero-Valdivieso, M., Y. Ortegón, and Y. Uscategui. 2013. "Biopolímeros: Avances Y Perspectivas." *Dyna* 80: 171-180. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49628728019>.

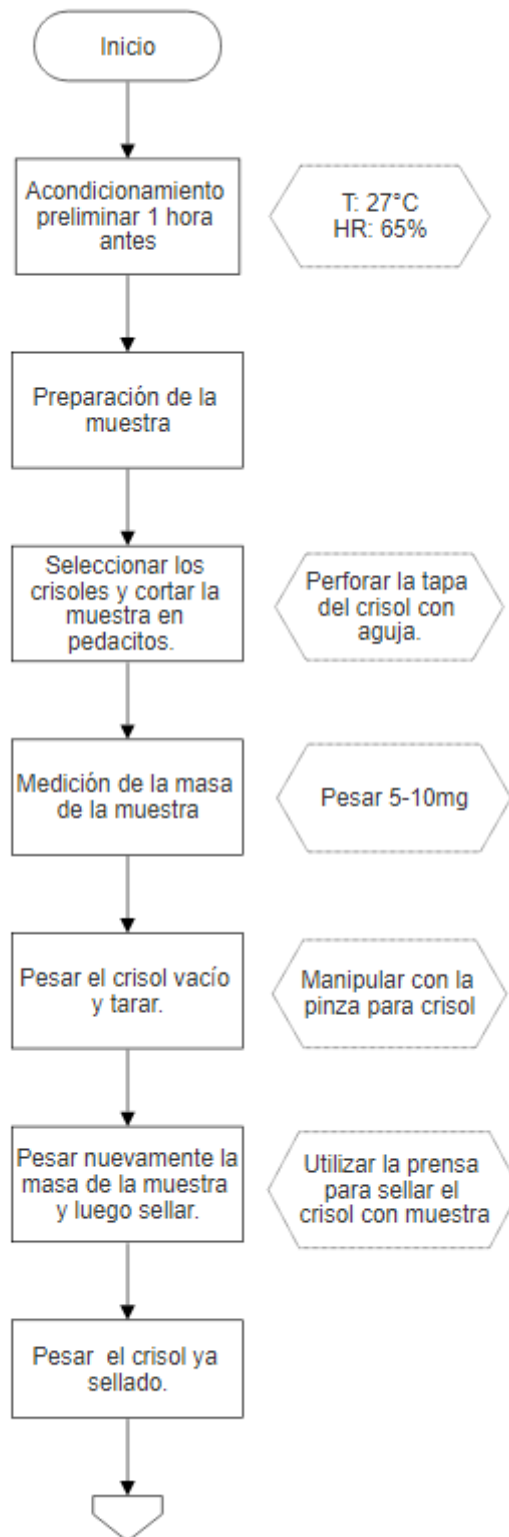
Vazquez, Alethia, Maribel Velasco Perez, Rosa Valdemar, and Margarita Beltrán Villavicencio. 2016. *Bioplásticos Y Plásticos Degradables*. doi:10.13140/RG.2.1.1294.4241.

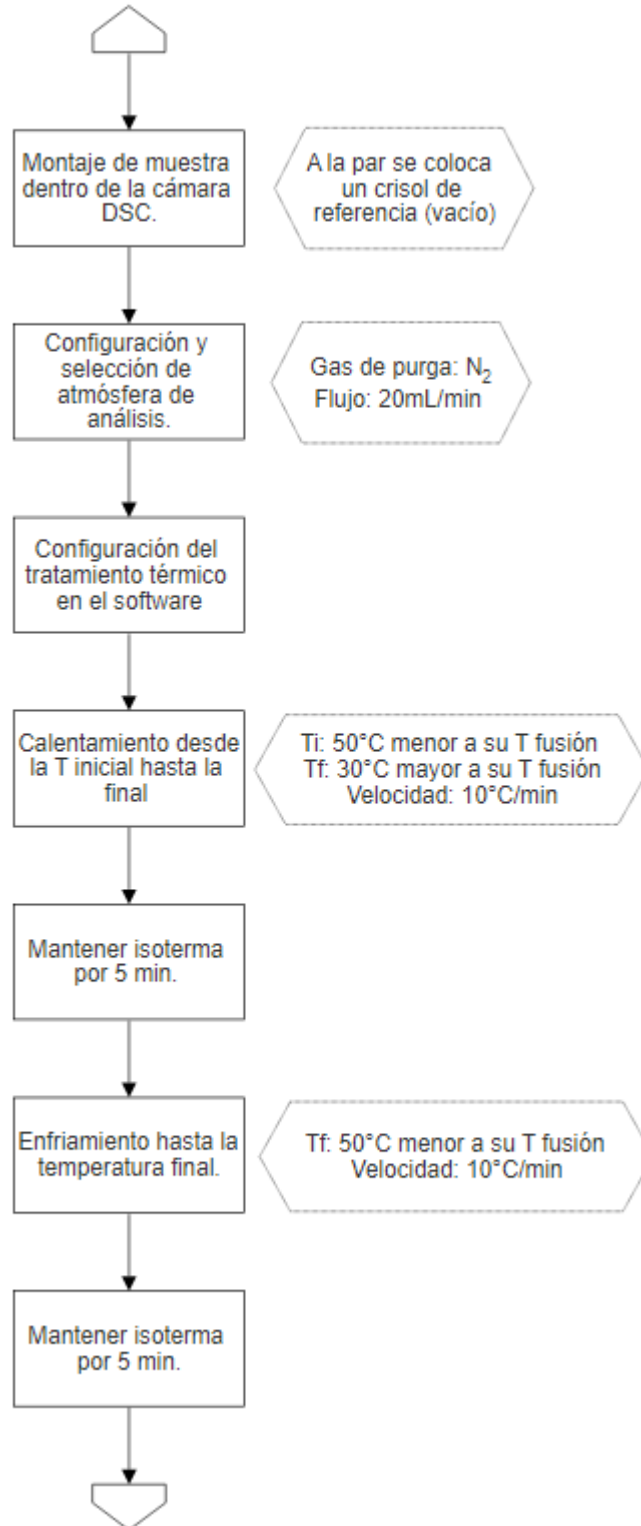
Zeenat, Amina Elahi, Dilara Abbas Bukhari, Saba Shamim, and Abdul Rehman. 2021. "Plastics Degradation by Microbes: A Sustainable Approach." *Journal of King Saud University - Science* 33 (6): 101538. doi:10.1016/j.jksus.2021.101538. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364721001993>.

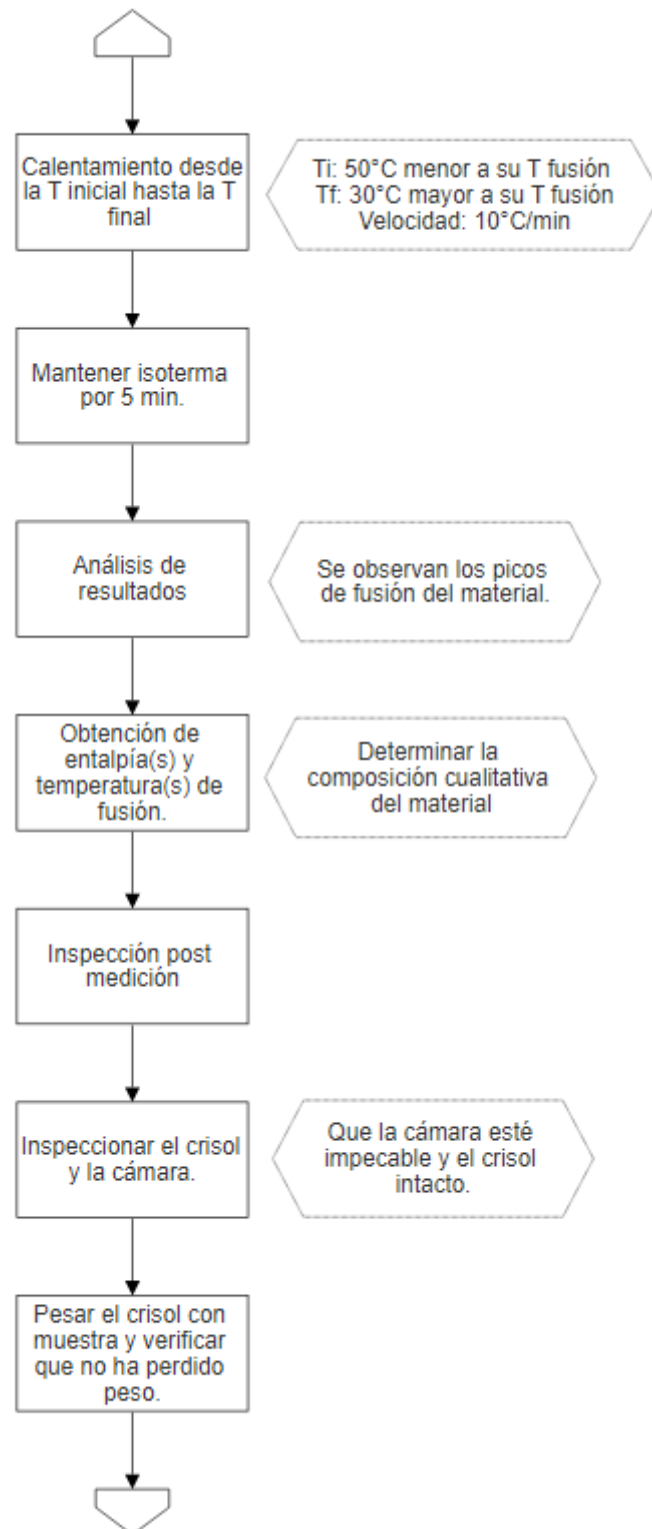


# ANEXO A

Diagramas de flujo de la metodología







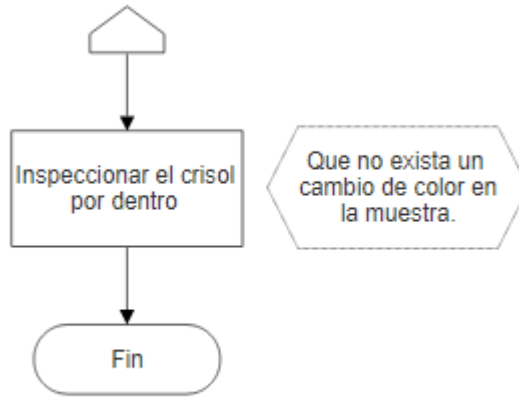


Fig.A-1 Diagrama de flujo del método general del análisis DSC. Fuente: Elaboración propia.

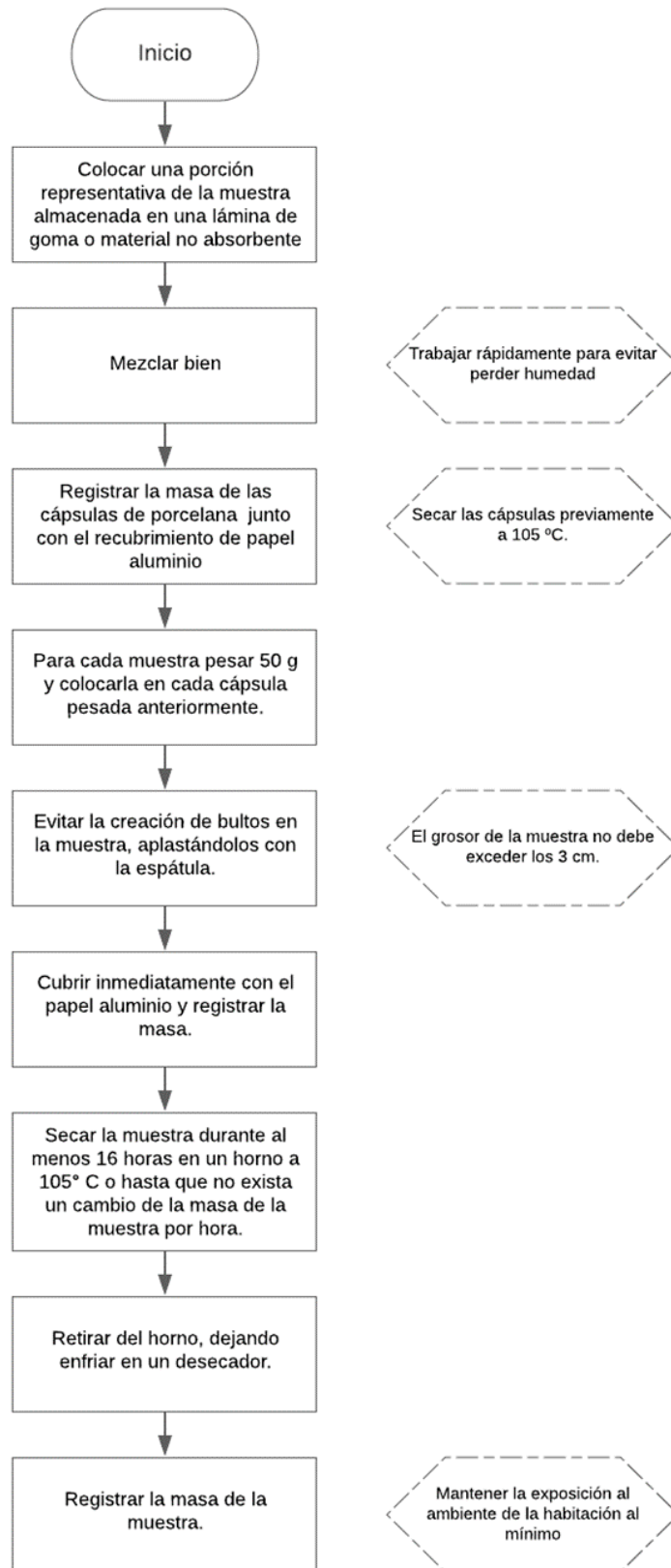


Fig.A-2 Diagrama de flujo de la metodología para la determinación de contenido de humedad en suelos. Fuente: Elaboración propia.

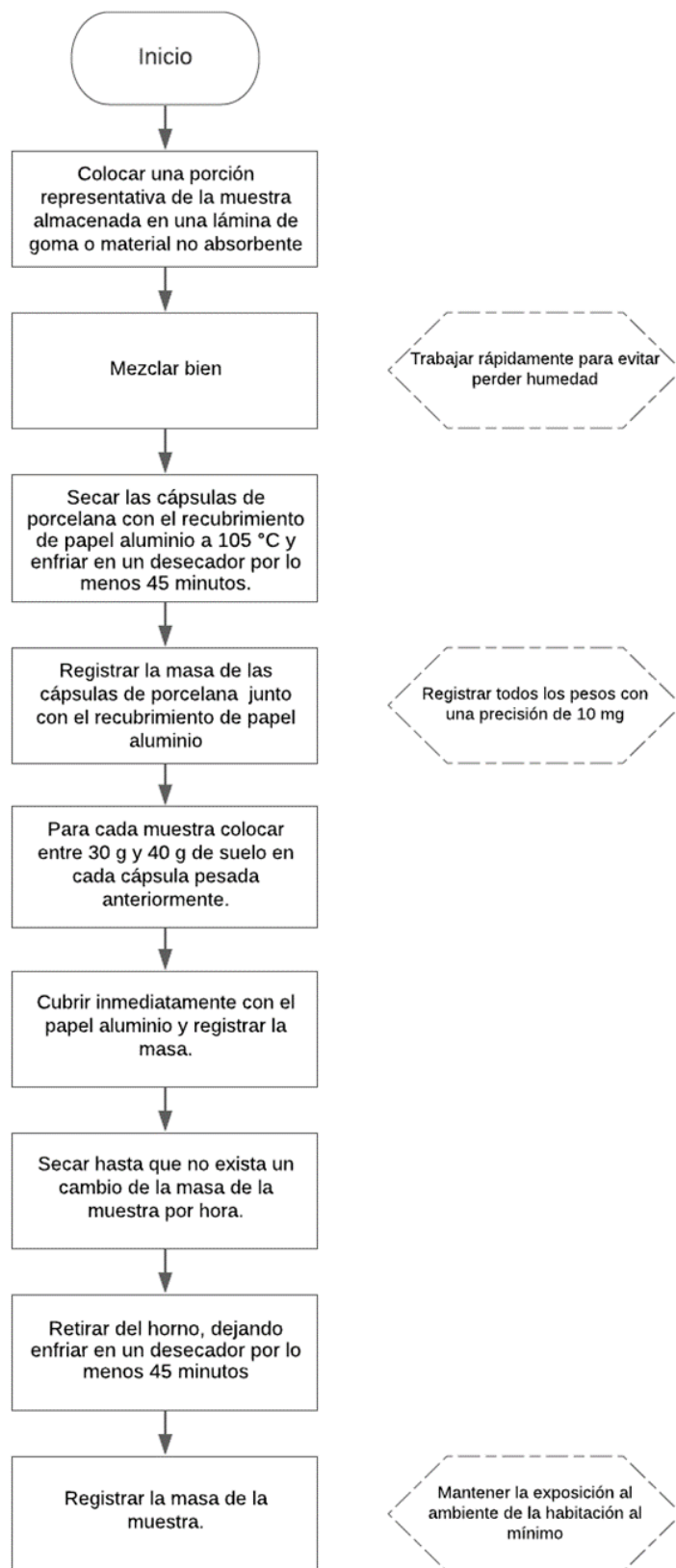
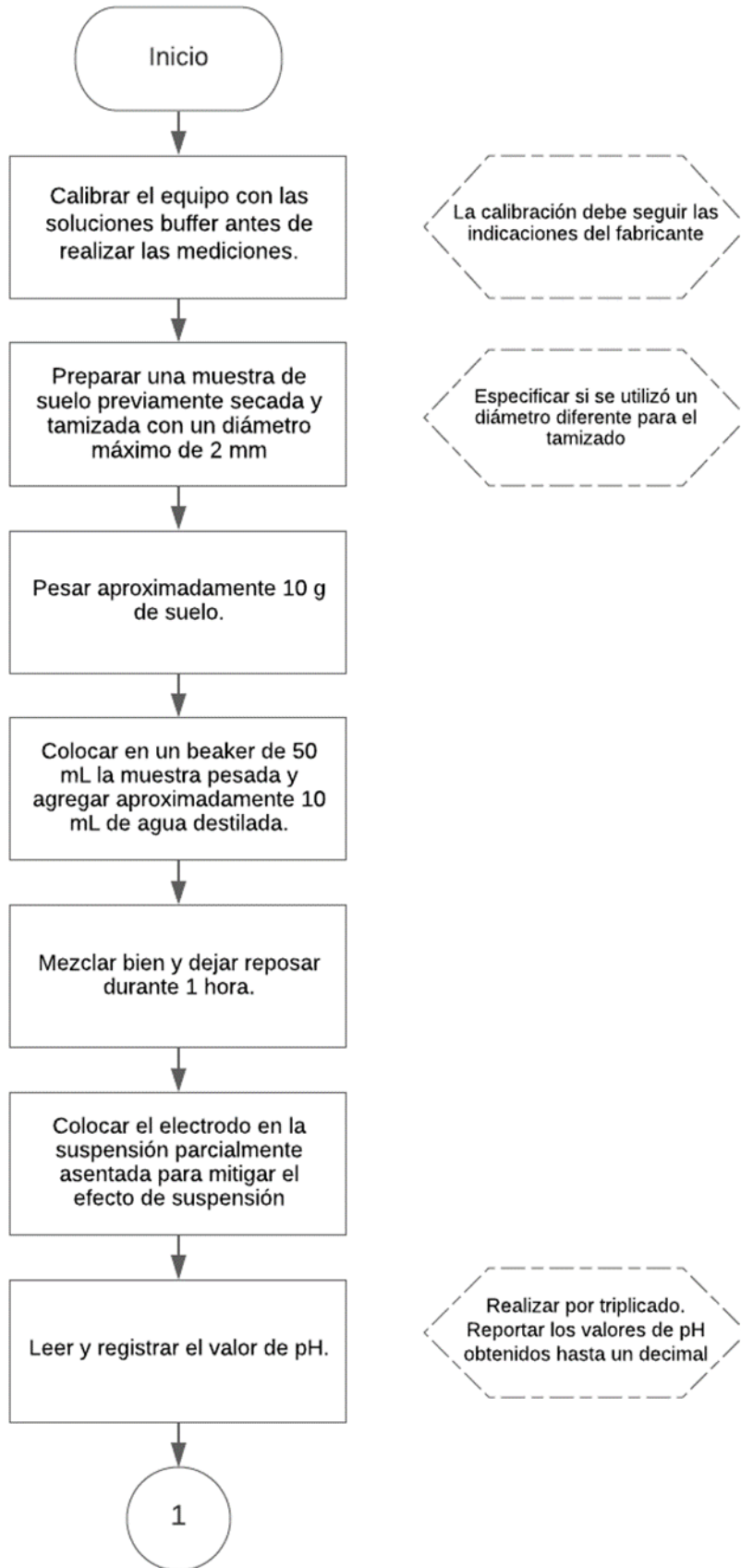


Fig.A-3 Diagrama de flujo de la metodología general para la determinación de contenido de S.T. en suelo. Fuente: Elaboración propia.





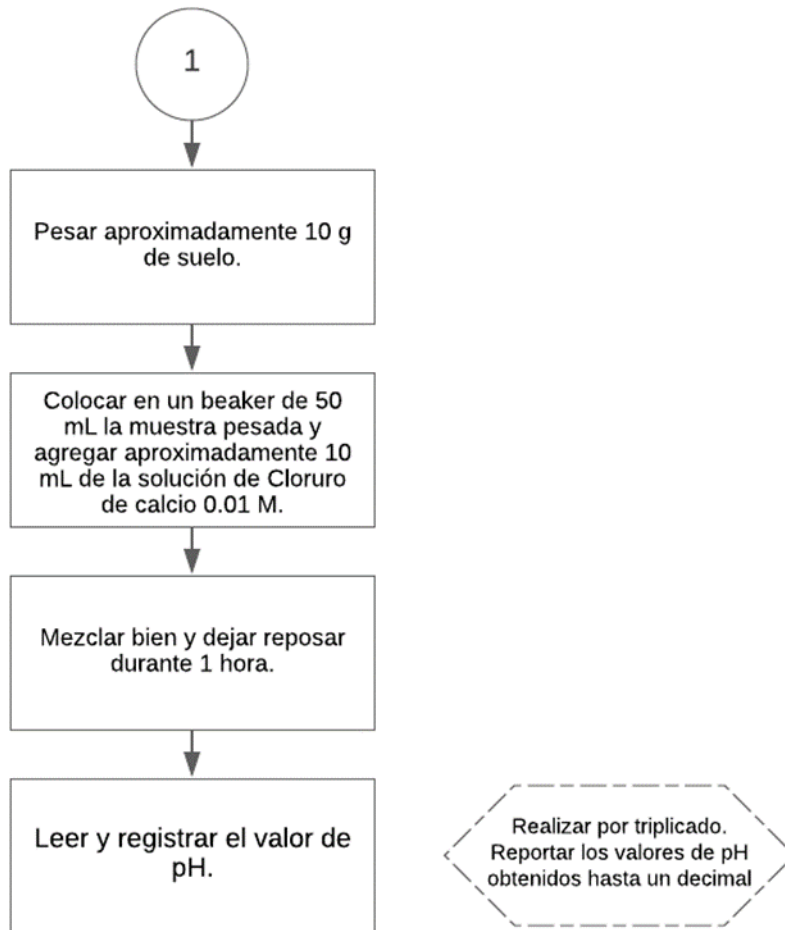
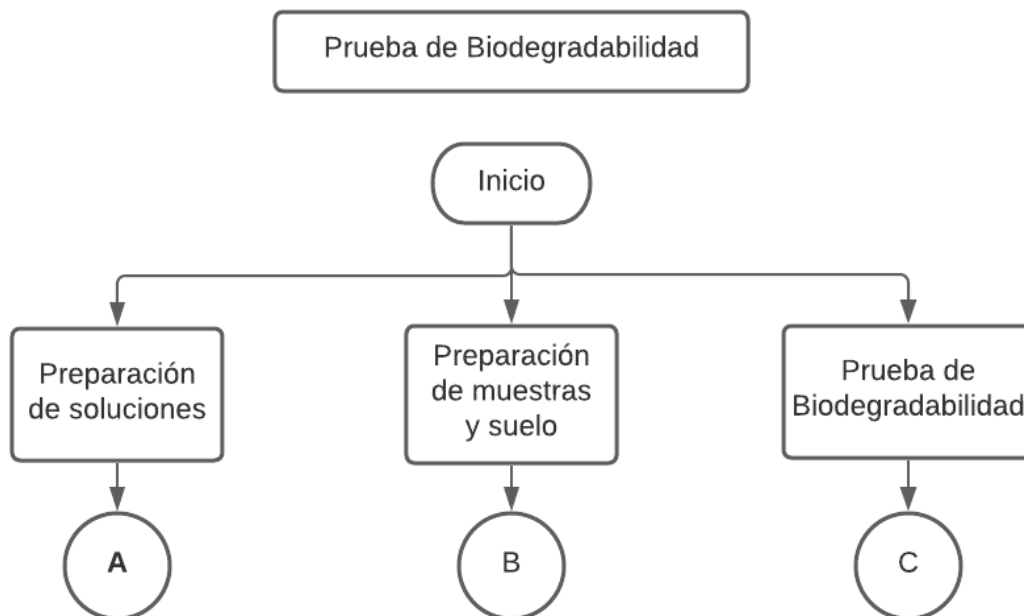


Fig.A-4 Diagrama de flujo de la metodología general para la determinación de pH en suelos. Fuente: Elaboración propia.



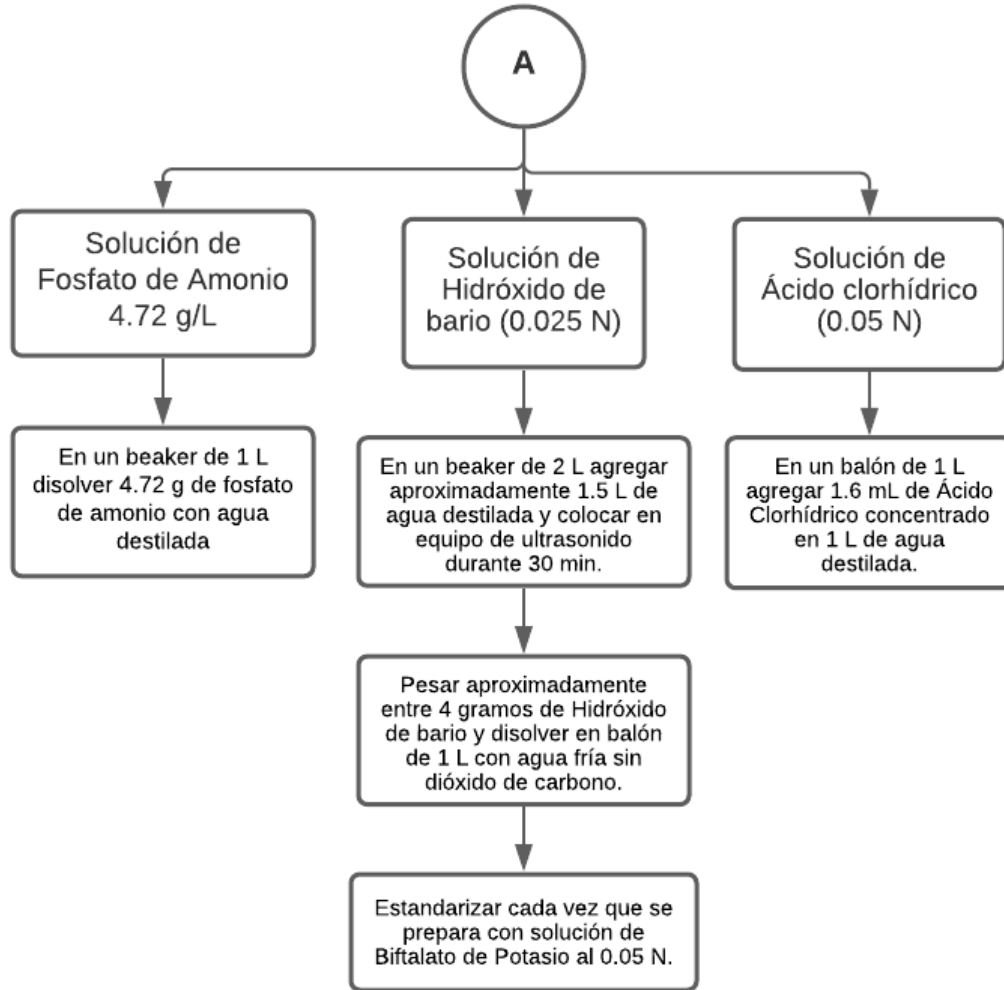


Fig. A-5 Diagrama de flujo de la preparación de soluciones para la prueba de biodegradabilidad. Fuente: Elaboración propia.

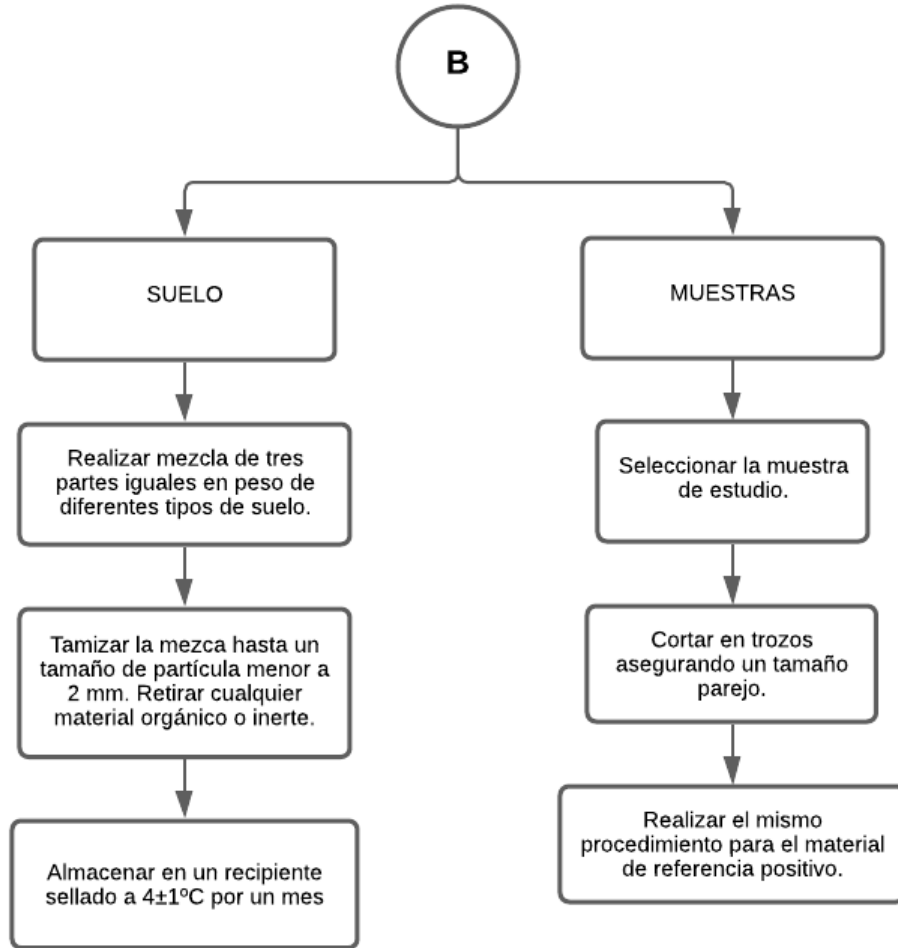
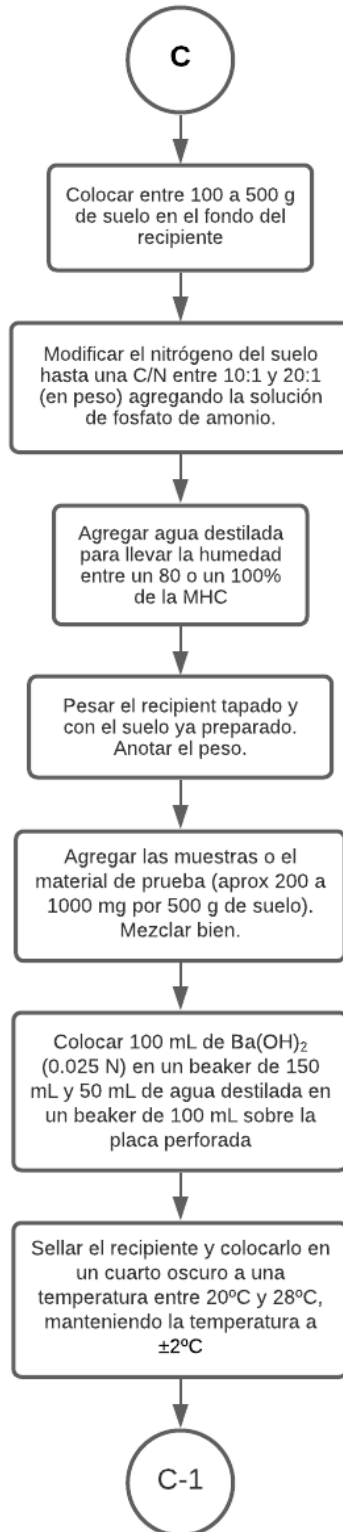


Fig.A-6 Diagrama de flujo de la preparación de muestras y suelo para la prueba de biodegradabilidad. Fuente: Elaboración propia.



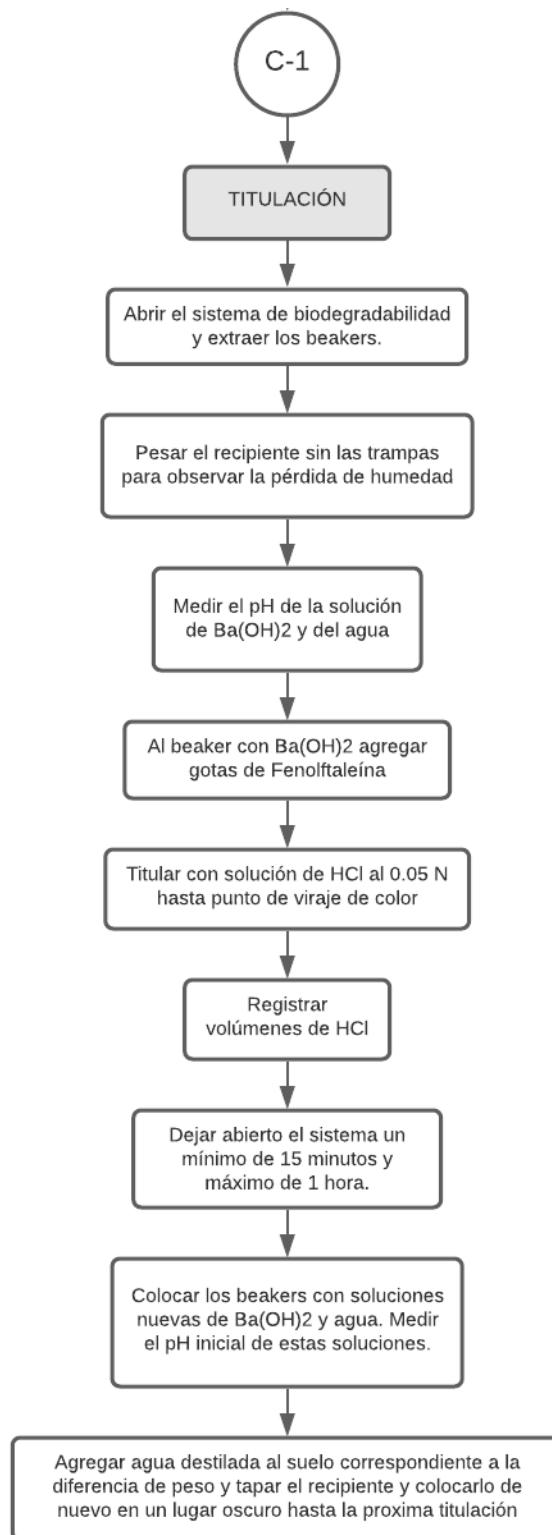


Fig.A-7 Diagrama de flujo de la prueba de biodegradabilidad. Fuente: Elaboración propia.

# ANEXO B

Tablas de resultados

## Metodología sin pretratamiento

- Contenido de humedad

Prueba 1:

Tabla B-1 Peso de las cápsulas de porcelana vacías.

Cápsulas vacías	
#1	130.94 g
#2	137.61 g
#3	138.32 g
#4	126.30 g
#5	137.67 g
#6	115.12 g

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

Tabla B-2 Peso de las cápsulas de porcelana vacías.

Cápsulas vacías	
#1	130.93 g
#2	137.61 g
#3	138.32 g
#4	126.30 g
#5	137.67 g
#6	115.12 g

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 1:

Tabla B-3 Peso de las muestras de suelo

Peso del suelo	
#1	50.08 g
#2	50.09 g
#3	49.99 g
#4	50.03 g
#5	50.08 g
#6	50.04 g

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

Tabla B-4 Peso de las muestras de suelo

Peso del suelo	
#1	50.05 g
#2	50.04 g
#3	50.01 g
#4	50.11 g
#5	50.08 g
#6	49.99 g

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 1:

Tabla B-5 Peso de las cápsulas más el suelo

Peso de cápsula + suelo	
#1	172.04 g
#2	178.73 g
#3	179.33 g
#4	167.18 g
#5	178.65 g
#6	156.08 g

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

Tabla B-6 Peso de las cápsulas más el suelo

Peso de cápsula + suelo	
#1	172.84g
#2	179.45 g
#3	180.13 g
#4	168.09 g
#5	179.44 g
#6	156.90 g

Fuente: Elaboración propia.

- Contenido de ceniza

Prueba 1:

Tabla B-7 Peso de la cápsula más la ceniza.

Peso de cápsula + ceniza	
#1	169.62 g
#2	176.10 g
#3	176.98 g
#4	164.72 g
#5	176.23 g
#6	153.46 g

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

Tabla B-8 Peso de la cápsula más la ceniza.

Peso de cápsula + ceniza	
#1	170.28 g
#2	176.83 g
#3	177.56 g
#4	165.72 g
#5	177.03 g
#6	154.41 g

Fuente: Elaboración propia.



- Resultados de pH de hidróxido de bario y agua

Prueba 1:

Tabla B-9 pH del hidróxido de bario.

Día	pH del Hidóxido de Bario														
	M1-1	M1-2	M1-3	M2-1	M2-2	M2-3	M3-1	M3-2	M3-3	B1	B2	CP1	CP2	CT1	CT2
3	11.89	11.90	11.82	12.05	12.05	12.10	11.85	11.86	11.88	11.92	11.90	11.56	11.72	11.97	12.06
7	11.85	11.88	11.86	12.08	12.08	12.08	11.54	11.66	11.55	11.73	11.79	8.45	8.99	11.83	11.95
10	12.00	12.00	11.99	12.02	12.02	12.00	11.79	11.81	11.73	12.03	11.91	11.44	11.58	12.09	12.12
13	11.89	11.90	11.78	11.95	11.97	11.92	11.45	11.60	11.41	11.90	11.98	11.34	11.50	12.01	12.02
15	12.07	12.06	12.04	12.09	12.10	12.08	11.92	11.92	11.89	12.01	12.01	11.88	11.87	12.09	12.06
17	12.01	12.00	12.00	12.05	12.04	11.98	11.88	11.91	11.86	11.99	11.96	11.86	11.85	12.06	12.02
20	12.02	12.00	11.97	12.06	12.05	12.02	11.76	11.83	11.78	12.00	11.91	11.66	11.68	12.13	12.13
22	12.04	12.04	12.04	12.10	12.10	12.08	11.94	11.97	11.93	12.09	12.02	11.87	11.91	12.09	12.11
24	12.08	12.10	12.11	12.13	12.15	12.18	11.99	12.03	11.95	12.10	12.11	11.98	11.97	12.15	12.16
27	12.10	12.11	12.13	12.16	12.14	12.16	11.92	11.96	11.91	12.09	12.06	11.87	11.90	12.16	12.15
29	12.16	12.16	12.15	12.19	12.18	12.13	12.02	12.06	12.03	12.08	12.11	12.01	11.99	12.21	12.22
31	12.13	12.13	12.19	12.14	12.14	12.11	12.05	12.05	12.02	12.15	12.10	12.00	12.03	12.21	12.19
34	12.04	12.07	12.08	12.07	12.07	12.07	11.87	11.91	11.85	12.05	12.00	11.83	11.84	12.11	12.18
36	12.07	12.11	12.04	12.13	12.12	12.13	12.02	11.92	11.95	12.07	12.06	11.97	11.99	12.15	12.19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-9 pH del agua.

Día	pH del Agua														
	M1-1	M1-2	M1-3	M2-1	M2-2	M2-3	M3-1	M3-2	M3-3	B1	B2	CP1	CP2	CT1	CT2
3	6.92	7.00	7.17	7.03	6.86	7.12	6.99	6.46	6.59	6.93	6.10	6.05	6.18	6.59	6.72
7	7.55	8.31	8.09	7.85	7.76	7.69	7.98	6.98	7.09	7.11	7.00	6.26	6.13	6.84	7.00
10	7.60	7.90	7.94	7.49	7.59	7.45	7.05	6.85	6.94	7.20	7.26	6.25	6.51	7.38	7.35
13	8.05	8.12	7.93	7.79	7.80	7.80	6.44	6.29	6.22	7.01	7.09	6.04	6.02	6.90	7.13
15	7.64	7.90	7.67	7.64	7.54	7.58	7.10	6.99	7.10	7.37	7.63	6.92	6.93	7.32	7.54
17	7.88	7.96	7.49	7.88	7.81	7.63	7.44	7.22	7.25	7.54	7.45	6.99	6.86	7.34	7.50
20	7.61	7.89	7.89	7.85	7.74	7.76	7.07	7.01	6.72	7.17	7.16	6.34	6.55	7.04	7.28
22	7.72	8.00	7.68	7.54	7.64	7.66	7.51	7.43	7.24	7.52	7.42	6.73	6.67	7.74	7.69
24	7.75	7.71	7.73	7.70	7.61	7.67	7.22	7.24	7.18	7.41	7.60	6.77	6.87	7.43	7.45
27	7.88	7.68	7.73	7.70	7.61	7.67	7.22	7.24	7.18	7.41	7.60	6.77	6.87	7.43	7.45
29	7.66	8.00	7.44	7.48	7.39	7.40	7.29	7.14	7.13	7.16	7.26	6.76	6.69	7.68	7.70
31	7.86	7.51	7.77	7.76	7.67	7.42	7.16	6.91	7.11	7.30	7.29	6.79	6.80	7.57	7.60
34	7.69	7.60	7.61	7.53	7.53	7.31	7.00	6.96	6.94	7.49	7.32	6.77	6.67	7.60	7.66
36	7.21	7.29	7.37	7.29	7.36	7.41	7.18	7.06	7.09	7.27	7.27	6.97	6.97	7.52	7.71

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

Tabla B-10 pH del hidróxido de bario.

Día	pH del Hidóxido de Bario														
	M4-1	M4-2	M5-1	M5-2	M6-1	M6-2	M7-1	M7-2	M7-3	B1	B2	CP1	CP2	CT1	CT2
3	12.16	12.17	12.18	12.18	11.79	11.93	12.26	12.25	12.24	12.18	12.20	11.99	11.99	12.24	12.27
7	12.11	12.11	12.13	12.11	9.38	11.23	12.13	12.11	12.08	12.08	12.09	11.29	11.37	12.17	12.19
10	12.01	12.02	12.05	12.01	10.80	11.33	12.08	11.99	12.01	12.02	12.03	11.48	11.56	12.10	12.11
12	12.03	12.08	12.05	12.09	11.89	11.91	12.09	12.03	12.07	12.07	12.08	11.86	11.89	12.11	12.12
14	12.08	12.10	12.10	12.08	11.91	11.98	12.10	12.09	12.00	12.05	12.11	11.90	11.86	12.09	12.07
17	12.08	12.11	12.10	12.09	11.79	11.81	12.09	12.08	12.10	12.11	12.16	11.76	11.71	12.18	12.21
19	12.13	12.17	12.17	12.17	12.01	12.04	12.18	12.19	12.17	12.18	12.20	12.03	12.04	12.24	12.26
21	12.11	12.13	12.15	12.16	12.03	12.06	12.17	12.15	12.16	12.18	12.21	12.02	12.02	12.22	12.23
24	12.08	12.12	12.17	12.17	11.94	11.94	12.17	12.11	12.16	12.14	12.20	11.87	11.89	12.27	12.17
26	12.01	12.04	12.11	12.07	11.96	11.99	12.13	12.04	12.07	12.14	12.16	11.92	11.96	12.15	12.15
28	11.99	12.09	12.09	12.06	11.88	11.88	12.05	12.02	12.09	12.10	12.15	11.90	11.90	12.13	12.11
31	11.97	12.01	12.04	12.08	11.78	11.75	12.02	12.01	12.02	12.09	12.13	11.71	11.85	12.27	12.23
33	12.07	12.10	12.13	12.13	12.00	12.01	12.12	12.12	12.14	12.15	12.17	11.97	12.01	12.20	12.22
36	12.03	12.06	12.04	12.07	11.73	11.75	12.03	11.98	12.05	12.09	12.10	11.59	11.83	12.11	12.16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-11 pH del agua.

Día	pH del Agua														
	M4-1	M4-2	M5-1	M5-2	M6-1	M6-2	M7-1	M7-2	M7-3	B1	B2	CP1	CP2	CT1	CT2
3	7.35	7.68	7.69	7.53	6.17	6.24	7.21	7.42	7.44	7.47	7.39	6.83	6.80	7.42	7.49
7	7.69	7.73	7.69	7.47	7.31	6.88	7.36	7.73	7.46	7.51	7.57	6.54	6.40	7.52	7.61
10	7.78	7.75	7.47	7.51	6.19	6.07	7.20	7.01	7.06	6.99	7.07	6.22	6.23	7.32	7.35
12	7.34	7.35	7.41	7.40	6.56	6.69	7.25	7.27	7.42	7.43	7.61	6.69	6.67	7.40	7.44
14	7.74	7.00	7.31	7.32	6.59	6.65	7.07	7.08	7.02	7.31	7.35	6.43	6.49	7.79	7.74
17	7.44	7.38	7.48	7.43	6.69	6.57	7.19	7.36	7.54	7.58	7.55	6.58	6.55	7.55	7.57
19	7.32	7.29	7.22	7.25	6.66	6.65	7.07	7.23	7.31	7.46	7.51	6.65	6.65	7.43	7.48
21	7.55	7.00	7.31	7.20	6.68	6.62	7.12	7.07	7.20	7.33	7.37	6.54	6.52	7.54	7.62
24	7.35	6.73	7.05	7.29	6.60	6.48	7.14	7.29	7.03	7.35	7.50	7.45	6.50	7.20	7.11
26	7.05	7.26	7.38	7.42	6.73	6.70	7.44	7.44	7.36	7.49	7.59	6.55	6.59	7.43	7.42
28	7.96	7.52	7.33	7.20	6.65	6.72	7.09	7.11	7.10	7.18	7.16	6.27	6.49	7.20	7.18
31	7.61	7.39	7.51	7.53	6.75	6.73	7.13	7.08	7.05	7.09	7.15	6.55	6.51	7.35	7.38
33	7.63	7.56	7.48	7.24	6.94	6.86	7.15	7.08	7.06	7.10	7.16	6.64	6.61	7.40	7.48
36	7.33	7.33	7.27	7.12	6.79	6.75	7.29	7.10	7.24	7.37	7.40	6.55	6.62	7.48	7.43

Fuente: Elaboración propia.

- Volumen gastado de HCl en la titulación

Prueba 1:

Tabla. B-12 Volumen gastado de HCl de las muestras

Día	(N)	Volumen gastado de ácido clorhídrico								
		M1-1	M1-2	M1-3	M2-1	M2-2	M2-3	M3-1	M3-2	M3-3
3	0.05	8.5	8.8	7.5	14.7	14.9	14.05	8.05	7.85	8.3
7	0.05	7.9	8.3	8	12.6	13.2	11.5	3.7	5.2	3.9
10	0.047	13.5	13	12.9	16	16.1	14	7.3	8.3	6.7
13	0.047	12.2	11.5	9.3	14.5	14.3	12.8	4.2	5.6	3.9
15	0.047	13.6	13.2	13	14.9	14.6	14.3	9.2	10.1	9.2
17	0.048	13.3	13	13	14.5	14.2	13.1	9	9.9	9
20	0.048	12.1	11.7	10.9	13.4	13.2	12.5	6.7	8.1	6.3
22	0.048	12.4	12.1	11.8	14	13.8	13.5	9.3	10.2	9
24	0.051	13.3	13.6	13.6	14.2	13.8	13.8	10.1	11	9.8
27	0.051	13.1	12.4	12.5	13.1	12.8	12.6	7.9	8.8	7.4
29	0.051	14.15	13.7	13.3	13.9	13.7	13.7	10.1	10.6	9.8
31	0.049	14.4	14.2	13.95	14.2	14.2	14.1	10.8	11.4	10.65
34	0.049	12.6	13	13.1	12.65	13	12.95	8.35	9.05	8
36	0.048	14.3	14.35	14	14.15	13.8	13.9	10.4	11.3	10.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla. B-13 Volumen gastado de HCl de los controles y el blanco.

Día	(N)	Volumen gastado de ácido clorhídrico					
		B1	B2	CP1	CP2	CT1	CT2
3	0.05	9.1	9.4	4.1	5.9	9.5	12.5
7	0.05	6	6.9	0	0	7.5	11.2
10	0.047	13.1	11	3.2	4.7	16	17
13	0.047	13	13.3	3.5	3.8	15.3	16
15	0.047	12.7	12.3	8.8	8.7	14.6	14.3
17	0.048	12.4	11.6	8.6	8.6	14	14.1
20	0.048	11.3	9.8	5.5	5.8	13.9	14.2
22	0.048	12.2	11.5	8.6	8.9	14.7	14.3
24	0.051	12.7	12.5	9.4	9.9	14.8	15
27	0.051	11.4	10.7	7	7.4	13.7	13.7
29	0.051	12.3	12.1	9.2	9.9	14.5	14.3
31	0.049	13.4	13.1	10.4	10.7	14.9	14.9
34	0.049	12.35	11.2	7.1	7.65	14.4	14.85
36	0.048	13	12.3	9.7	10	14.9	15.1

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

Tabla. B-14 Volumen gastado de HCl de las muestras.

		Volumen gastado de ácido clorhídrico								
Día	(N)	M4-1	M4-2	M5-1	M5-2	M6-1	M6-2	M7-1	M7-2	M7-3
3	0.049	13.2	13.3	13.95	13.9	5.5	7.9	16.5	16.35	15.75
7	0.049	13.7	13.25	13.8	13.6	0.2	1.95	13.7	12.8	12.5
10	0.049	11.85	11.5	12.5	11.2	0.9	2.6	11.95	10.35	10.9
12	0.049	13.7	13.7	13.7	13.5	8.35	9.2	13.85	12.55	13
14	0.049	14.8	14.45	14.4	13.6	9.3	10	14.1	13.05	13.1
17	0.049	12.95	12.8	12.5	12.1	6.8	6.15	12.25	11.45	11.95
19	0.047	15.8	15.4	15.1	14.75	10.6	11.35	14.35	14.3	14.5
21	0.047	15.55	15.25	15.05	14.8	10.95	11.4	14.8	13.9	14.3
24	0.047	14.5	14.2	13.7	13.35	7.7	7.9	13	11.6	13.4
26	0.048	15.5	15.2	14.9	14.6	10.4	10.9	14.45	13.1	13.9
28	0.048	14.9	14.75	13.7	13.95	9.65	9.8	13.2	12.6	13.8
31	0.048	13.3	12.85	12.65	12.3	6.6	6.2	11.1	10.7	10.9
33	0.048	15.8	15.7	15.6	15.1	10.8	11	14.05	13.9	14.55
36	0.048	14.6	14.45	13.25	13.6	6.9	6.45	12	10.7	12.7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla. B-15 Volumen gastado de HCl de los controles y el blanco.

		Volumen gastado de ácido clorhídrico					
Día	(N)	B1	B2	CP1	CP2	CT1	CT2
3	0.049	13.3	13.9	8.8	9.1	16	16.5
7	0.049	12.4	13	2.2	3	15.3	16.1
10	0.049	11	12.3	3.35	3.95	13.9	14.5
12	0.049	13.6	13.8	7.95	8.6	14.55	14.95
14	0.049	13.3	13.85	9	8.65	15.1	15.5
17	0.049	11.85	13.3	5.2	4.85	14.3	14.9
19	0.047	14.85	15.5	10.05	10.05	16.3	16.7
21	0.047	14.35	15.55	10	10.25	15.9	16.3
24	0.047	12.9	14.65	6.65	7.1	15.45	16.2
26	0.048	14.4	15.3	8.9	9.9	16	16
28	0.048	14.1	14.8	9.3	9.8	15.9	16
31	0.048	11.95	13.05	5.4	6.9	14.7	15.3
33	0.048	15	15.8	9.8	10.9	16.35	16.9
36	0.048	13.65	14.2	4.3	7.5	15.3	16

Fuente: Elaboración propia.

- Masa de dióxido de carbono generado por cada muestra

Tabla B-16 Miligramos de dióxido de carbono producidos por cada muestra en el tiempo.

Dias	M1	M2	M3	CP1	Dias	M4	M5	M6	M7	CP2
0	0 mg	0 mg	0 mg	0 mg	0	0 mg	0 mg	0 mg	0 mg	0 mg
3	1.08 mg	0 mg	1.3 mg	4.68 mg	3	0.38 mg	0 mg	7.39 mg	0 mg	4.98 mg
7	1.08 mg	0 mg	3.7 mg	11.78 mg	7	0.38 mg	0 mg	20.45 mg	0 mg	16.33 mg
10	1.08 mg	0 mg	8.48 mg	20.21 mg	10	0.38 mg	0 mg	31.15 mg	0.63 mg	24.97 mg
13	3.30 mg	0 mg	17.35 mg	30.03 mg	12	0.38 mg	0.11 mg	36.47 mg	1.24 mg	30.83 mg
15	3.30 mg	0 mg	20.45 mg	33.91 mg	14	0.38 mg	0.11 mg	46.12 mg	1.41 mg	35.96 mg
17	3.30 mg	0 mg	23.3 mg	37.5 mg	17	0.38 mg	0.41 mg	52.71 mg	2.17 mg	44.12 mg
20	3.30 mg	0 mg	27.02 mg	42.67 mg	19	0.38 mg	0.67 mg	57.09 mg	2.87 mg	49.47 mg
22	3.30 mg	0 mg	29.5 mg	45.94 mg	21	0.38 mg	0.70 mg	61.03 mg	3.51 mg	54.49 mg
24	3.30 mg	0 mg	32.08 mg	49.25 mg	24	0.38 mg	0.95 mg	67.26 mg	4.66 mg	61.69 mg
27	3.30 mg	0 mg	35.47 mg	53.57 mg	26	0.38 mg	1.06 mg	71.65 mg	5.74 mg	67.39 mg
29	3.30 mg	0 mg	37.75 mg	56.54 mg	28	0.38 mg	1.71 mg	76.59 mg	7.04 mg	72.51 mg
31	3.30 mg	0 mg	40.24 mg	59.46 mg	31	0.38 mg	1.74 mg	82.96 mg	8.72 mg	79.15 mg
34	3.30 mg	0 mg	43.82 mg	64.22 mg	33	0.38 mg	1.79 mg	87.73 mg	10.02 mg	84.5 mg
36	3.30 mg	0 mg	45.92 mg	67.18 mg	36	0.38 mg	2.32 mg	95.43 mg	12.28 mg	93.02 mg

Fuente: Elaboración propia.

- Porcentaje de biodegradabilidad de cada muestra

Tabla B-17 Porcentaje de biodegradabilidad de cada muestra en el tiempo.

Dias	M1	M2	M3	CP1	Dias	M4	M5	M6	M7	CP2
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3	0.02%	0.00%	0.03%	0.13%	3	0.01%	0.00%	0.11%	0.00%	0.14%
7	0.02%	0.00%	0.07%	0.34%	7	0.01%	0.00%	0.29%	0.00%	0.46%
10	0.02%	0.00%	0.16%	0.57%	10	0.01%	0.00%	0.44%	0.01%	0.71%
13	0.05%	0.00%	0.33%	0.85%	12	0.01%	0.00%	0.52%	0.02%	0.88%
15	0.05%	0.00%	0.39%	0.96%	14	0.01%	0.00%	0.66%	0.02%	1.02%
17	0.05%	0.00%	0.45%	1.07%	17	0.01%	0.01%	0.75%	0.03%	1.25%
20	0.05%	0.00%	0.52%	1.21%	19	0.01%	0.01%	0.81%	0.04%	1.41%
22	0.05%	0.00%	0.57%	1.31%	21	0.01%	0.01%	0.87%	0.05%	1.55%
24	0.05%	0.00%	0.62%	1.40%	24	0.01%	0.01%	0.96%	0.07%	1.75%
27	0.05%	0.00%	0.68%	1.49%	26	0.01%	0.02%	1.02%	0.08%	1.91%
29	0.05%	0.00%	0.73%	1.61%	28	0.01%	0.03%	1.09%	0.10%	2.06%
31	0.05%	0.00%	0.77%	1.69%	31	0.01%	0.03%	1.18%	0.13%	2.25%
34	0.05%	0.00%	0.84%	1.82%	33	0.01%	0.03%	1.25%	0.15%	2.40%
36	0.05%	0.00%	0.88%	1.91%	36	0.01%	0.03%	1.36%	0.18%	2.64%

Fuente: Elaboración propia.

## Metodología con pretratamiento

- Contenido de humedad

Tabla B.18 Peso de las cápsulas de porcelana vacías.

Cápsulas vacías	
#1	68.18 g
#2	68.91 g
#3	75.68 g
#4	71.02 g
#5	54.04 g
#6	75.46 g

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla B.19 Peso de las muestras de suelo

Peso del suelo	
#1	50.01 g
#2	50.02 g
#3	50.08 g
#4	50.00 g
#5	50.02 g
#6	50.00 g

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla B.20 Peso de las cápsulas más el suelo

Peso de cápsula + suelo	
#1	113.45 g
#2	113.65 g
#3	120.19 g
#4	115.65 g
#5	98.94 g
#6	121.59 g

FUENTE: Elaboración propia.

- Contenido de ceniza

Tabla B.21 Peso de la cápsula más la ceniza.

Peso de cápsula + ceniza	
#1	110.61 g
#2	110.79 g
#3	117.39 g
#4	112.86 g

FUENTE: Elaboración propia.

- Resultados de pH de hidróxido de bario y agua

Prueba 1:

Tabla B-22 pH del hidróxido de bario.  
pH del Hidóxico de Bario

Día	M8-1	M9-1	M9-2	M10-1	M10-2	M11-1	M11-2	B3	CP3	CT3
3	12.11	12.25	12.04	12.14	12.15	12.01	12.03	12.06	11.69	12.32
5	11.83	11.87	12.01	12.03	11.85	11.76	11.87	11.96	11.58	12.06
7	12.06	12.02	12	11.88	11.95	11.67	11.78	11.74	11.58	11.93
10	12.07	12.1	12.06	12.06	11.94	11.88	11.95	12.05	11.48	12.12
13	12.22	12.2	12.14	12.05	12.11	12.05	11.98	11.98	11.88	12.06
17	12.02	12.06	12.03	12	11.97	11.84	11.9	11.95	11.59	12.08
20	12.11	12.15	12.15	12.15	12.15	12.08	12.1	12.12	11.97	12.14
24	12.11	11.98	11.96	11.91	11.94	11.88	11.87	11.85	11.13	12.17
27	12.17	12.11	12.08	12.09	12.05	12.01	12.03	11.99	11.54	12.17
31	12.09	12.02	11.99	11.98	11.94	11.9	11.91	11.87	10.97	12.15
35	12.16	12.11	12.1	12.1	12.08	12.05	12.02	11.98	11.26	12.25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-23 pH del agua.  
pH del Agua

Día	M8-1	M9-1	M9-2	M10-1	M10-2	M11-1	M11-2	B3	CP3	CT3
3	7.72	8.01	7.68	7.65	7.42	7.33	7.22	7.11	6.77	7.38
5	8.4	8.14	7.93	7.93	8.08	7.95	7.8	7.91	6.8	8.16
7	8.15	7.07	6.84	7.07	7.02	7.01	7.06	7.13	6.68	7.22
10	7.3	7.16	7.05	7.06	6.9	6.76	6.86	6.93	6.45	7.17
13	6.91	6.86	6.85	6.8	6.67	6.7	6.68	6.72	6.31	7.02
17	6.71	6.74	6.76	6.76	6.68	6.69	6.59	6.63	6.19	6.8
20	6.43	6.44	6.54	6.53	6.44	6.48	6.51	6.59	6.41	6.7
24	6.48	6.36	6.3	6.36	6.28	6.15	6.18	6.22	5.53	6.89
27	6.15	6.43	6.46	6.43	6.46	6.37	6.37	6.47	5.62	7
31	6.47	6.63	6.59	6.48	6.41	6.32	6.33	6.26	5.5	6.69
35	6.27	6.32	6.45	6.49	6.4	6.4	6.42	6.35	5.72	6.68

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

Tabla B-24 pH del hidróxido de bario.

pH del Hidóxido de Bario									
Día	M12-1	M12-2	M13-1	M13-2	M14-1	M14-2	B4	CP4	CT4
3	12.01	11.95	11.87	11.89	11.93	11.9	12.05	11.48	12.12
6	12.03	11.96	11.82	11.98	12.02	12.07	11.98	11.88	12.06
10	11.91	11.85	11.58	11.83	11.91	12	11.95	11.59	12.08
13	12.13	12.1	12	12.01	12.07	12.16	12.12	11.97	12.14
17	11.8	11.85	11.76	11.77	11.83	11.92	11.85	11.13	12.17
20	12	11.99	11.92	11.97	12.01	12.06	11.99	11.54	12.17
24	11.88	11.85	11.94	11.85	11.91	11.96	11.87	10.97	12.15
28	12.05	11.98	11.86	11.92	12.09	12.11	11.98	11.26	12.25
33	11.89	11.87	11.7	11.87	11.97	11.99	11.87	8.6	12.18
35	12.12	12.11	12.04	12.1	12.1	12.16	12.09	11.91	12.21

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-25 pH del agua.

pH del Agua									
Día	M12-1	M12-2	M13-1	M13-2	M14-1	M14-2	B4	CP4	CT4
3	7.03	6.93	6.82	6.94	6.93	7.01	6.93	6.45	7.17
6	6.94	6.73	6.67	6.77	6.81	6.85	6.72	6.31	7.02
10	6.85	6.67	6.49	6.55	6.72	6.76	6.63	6.19	6.8
13	6.83	6.58	6.56	6.6	6.67	6.7	6.59	6.41	6.7
17	6.4	6.1	6.14	6.09	6.29	6.48	6.22	5.53	6.89
20	6.61	6.37	6.26	6.3	6.47	6.5	6.47	5.62	7
24	6.56	6.41	6.2	6.16	6.43	6.53	6.26	5.5	6.69
28	6.66	6.38	6.24	6.32	6.48	6.52	6.35	5.72	6.68
33	6.57	6.26	6.12	6.27	6.49	6.62	6.39	5.52	6.77
35	6.63	6.33	6.47	6.33	6.47	6.64	6.48	5.62	6.68

Fuente: Elaboración propia.



- Volumen gastado de HCl en la titulación

Prueba 1:

Tabla. B-26 Volumen gastado de HCl

Día	(N)	Volumen gastado de ácido clorhídrico									
		M8-1	M9-1	M9-2	M10-1	M10-2	M11-1	M11-2	B3	CP3	CT3
3	0.051	11.1	11.4	9.9	11.3	9.1	9.4	9.6	6.4	13.2	10.7
5	0.051	14.1	14.1	13.9	14.1	13.6	13	12.8	12.9	10.2	14.55
7	0.051	13.8	13.7	12.8	13.4	13.1	12.4	12.5	12.5	9.6	14.7
10	0.051	12.6	12.9	13.2	12.8	12.1	10.6	11.1	10.9	7.6	13.5
13	0.051	13.7	14	14.1	13.8	13	12.3	12	12	8.6	14.8
17	0.05	12.4	12.5	12.5	12	11.2	9.9	9.1	9.6	6.3	13.4
20	0.05	14.2	14.2	14.4	13.6	12.8	11.5	11.4	11.9	8.7	14.6
24	0.05	10.4	8.4	8	7.7	7.2	6.8	6.4	6	1.2	14
27	0.05	12.7	11.4	10.8	10.8	9.9	9.4	9.3	8.8	4.5	14.7
31	0.049	12.4	10.4	10	9.6	8.7	8.4	8.5	7.2	1.1	14.9
35	0.049	13.4	11.4	11.4	11	9.8	10.6	9.3	8.1	1.7	15.6

Fuente: Elaboración propia.

Prueba 2:

Tabla. B-27 Volumen gastado de HCl

Día	(N)	Volumen gastado de ácido clorhídrico								
		M12-1	M12-2	M13-1	M13-2	M14-1	M14-2	B4	CP4	CT4
3	0.051	10.6	10.5	8.7	10	10.1	11.8	10.9	7.6	13.5
6	0.051	12	12.3	9.4	11.6	12.1	13.6	12	8.6	14.8
10	0.05	10.85	10.3	7.4	9.7	9.4	12.3	9.6	6.3	13.4
13	0.05	13.1	12.2	9.9	11.2	11.8	13.4	11.9	8.7	14.6
17	0.05	5.7	6.1	5.1	6.2	6.5	7.8	6	1.2	14
20	0.05	9	8.8	7.2	8.8	8.9	10.6	8.8	4.5	14.7
24	0.049	7.5	7.3	6	7.4	8.2	9.3	7.2	1.1	14.9
28	0.049	9.5	8	6.6	8	10.1	10.5	8.1	1.7	15.6
33	0.049	8.4	7.3	5.1	7	9	10	6.9	0	15.1
35	0.049	13.3	12.9	11.5	12.9	13	14.4	12.8	9.6	16.6

Fuente: Elaboración propia.

- Masa de dióxido de carbono generado por cada muestra

#### Prueba 1

Tabla B-28 Miligramos de dióxido de carbono producidos por cada muestra en el tiempo.

Dias	M8	M9	M10	M11	CP
0	0 mg	0 mg	0 mg	0 mg	0 mg
3	0 mg	0 mg	0 mg	0.39 mg	3.58 mg
5	0 mg	0 mg	0 mg	0.39 mg	6.59 mg
7	0 mg	0 mg	0 mg	0.45 mg	9.83 mg
10	0 mg	0 mg	0 mg	0.50 mg	13.52 mg
13	0 mg	0 mg	0 mg	0.50 mg	17.32 mg
17	0 mg	0 mg	0 mg	0.61 mg	20.95 mg
20	0 mg	0 mg	0 mg	1.11 mg	24.47 mg
24	0 mg	0 mg	0 mg	1.11 mg	29.75 mg
27	0 mg	0 mg	0 mg	1.11 mg	34.48 mg
31	0 mg	0 mg	0 mg	1.11 mg	41.06 mg
35	0 mg	0 mg	0 mg	1.11 mg	47.96 mg

Fuente: Elaboración propia.

#### Prueba 2

Tabla B-29 Miligramos de dióxido de carbono producidos por cada muestra en el tiempo.

Dias	M12	M13	M14	CP
0	0 mg	0 mg	0 mg	0 mg
3	0.39 mg	1.73 mg	0 mg	3.69 mg
6	0.39 mg	3.41 mg	0 mg	7.49 mg
10	0.39 mg	4.56 mg	0 mg	11.12 mg
13	0.39 mg	6.05 mg	0 mg	14.64 mg
17	0.50 mg	6.43 mg	0 mg	19.92 mg
20	0.50 mg	7.31 mg	0 mg	24.65 mg
24	0.50 mg	7.85 mg	0 mg	31.23 mg
28	0.50 mg	8.72 mg	0 mg	38.19 mg
33	0.50 mg	9.63 mg	0 mg	45.57 mg
35	0.50 mg	10.28 mg	0 mg	49.02 mg

Fuente: Elaboración propia.

- Porcentaje de biodegradabilidad de cada muestra

#### Prueba 1

Tabla B-30 Porcentaje de biodegradabilidad de cada muestra en el tiempo.

Días	M8	M9	M10	M11	CP
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.20%
5	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.37%
7	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.56%
10	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.77%
13	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.98%
17	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	1.19%
20	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	1.39%
24	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	1.69%
27	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	1.96%
31	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	2.33%
35	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	2.73%

Fuente: Elaboración propia.

#### Prueba 2

Tabla B-31 Porcentaje de biodegradabilidad de cada muestra en el tiempo.

Días	M12	M13	M14	CP
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
3	0.01%	0.03%	0.00%	0.21%
6	0.01%	0.05%	0.00%	0.43%
10	0.01%	0.07%	0.00%	0.63%
13	0.01%	0.09%	0.00%	0.83%
17	0.01%	0.10%	0.00%	1.13%
20	0.01%	0.11%	0.00%	1.40%
24	0.01%	0.19%	0.00%	1.77%
28	0.01%	0.33%	0.00%	2.17%
33	0.01%	0.47%	0.00%	2.59%
35	0.01%	0.56%	0.00%	2.79%

Fuente: Elaboración propia