

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Implementación del método estándar ASTM D5338 a
escala laboratorio para evaluar la
biodegradabilidad de materiales poliméricos

Trabajo de graduación presentado por María Isabel Rodas
Ramírez para optar al grado académico de Licenciada en
Ingeniería Química

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería




Implementación del método estándar ASTM D5338 a
escala laboratorio para evaluar la
biodegradabilidad de materiales poliméricos

Trabajo de graduación presentado por María Isabel Rodas
Ramírez para optar al grado académico de Licenciada en
Ingeniería Química


Guatemala,


2024

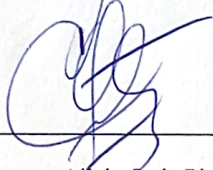
Vo. Bo.

(f) 
Ing. Luis Ernesto Núñez González

Terna examinadora

(f) 
Ing. Luis Ernesto Núñez González

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

Fecha de aprobación: Guatemala, 12 de diciembre de 2024

Índice

<i>Índice de cuadros</i>	<i>ii</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>iv</i>
<i>Lista de abreviaturas y siglas</i>	<i>vi</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>vii</i>
<i>Resumen</i>	<i>viii</i>
<i>Abstract</i>	<i>ix</i>
<i>I. Introducción</i>	<i>1</i>
<i>II. Antecedentes</i>	<i>3</i>
<i>III. Justificación</i>	<i>5</i>
<i>IV. Objetivos</i>	<i>7</i>
A. Objetivo general	<i>7</i>
B. Objetivos específicos.....	<i>7</i>
<i>V. Marco teórico</i>	<i>8</i>
A. Polímeros.....	<i>8</i>
B. Biopolímeros	<i>12</i>
C. Degradación	<i>13</i>
D. Biodegradación	<i>14</i>
E. Compostaje.....	<i>15</i>
F. Normativa para biodegradabilidad	<i>17</i>
G. Polímeros biodegradables	<i>18</i>
H. Impacto en Guatemala y el mundo.....	<i>20</i>
I. Flujómetros.....	<i>22</i>
J. Medidores de dióxido de carbono	<i>22</i>
<i>VI. Metodología</i>	<i>23</i>
<i>VII. Resultados</i>	<i>29</i>

A.	Dimensionamiento y esquematización del equipo	29
B.	Método de biodegradabilidad.....	34
C.	Biodegradabilidad de materiales	44
D.	Determinación de biodegradabilidad de una bolsa etiquetada como tal	49
VIII.	<i>Discusión de resultados</i>	50
IX.	<i>Conclusiones</i>	57
X.	<i>Recomendaciones</i>	58
XI.	<i>Referencias bibliográficas</i>	60
XII.	<i>Apéndice</i>	64
XIII.	<i>Anexos</i>	110
A.	Norma ASTM original	110
B.	Manual del sensor PASCO medidor de dióxido de carbono.....	139
C.	Ficha técnica de flujómetro Marca GASTEK	142
XIV.	<i>Glosario</i>	143

Índice de cuadros

Cuadro 1 Parámetros del estándar para considerarse como un plástico biodegradable y requerimientos de la experimentación	4
Cuadro 2 Estándares disponibles sobre biodegradabilidad de plásticos	17
Cuadro 3 Dimensionamiento de equipo necesario para implementación de sistema según requerimientos	29
Cuadro 4 Condiciones de operación	31
Cuadro 5 Definición de partes del sistema de biodegradabilidad	31
Cuadro 6 Producción de CO ₂ del PHA a lo largo de la prueba.....	44
Cuadro 7 Producción de CO ₂ del papel muestra No.1 a lo largo de la prueba	45
Cuadro 8 Producción de CO ₂ del papel muestra No.2 a lo largo de la prueba	45
Cuadro 9 Producción de CO ₂ del papel muestra No.3 a lo largo de la prueba	46
Cuadro 10 Producción de CO ₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.1 a lo largo de la prueba..	46
Cuadro 11 Producción de CO ₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.2 a lo largo de la prueba..	47
Cuadro 12 Producción de CO ₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.3 a lo largo de la prueba..	47
Cuadro 13 Resultados de biodegradación de materiales en sistema de compostaje	48
Cuadro 14 Parámetros para prueba de hipótesis	49
Cuadro 15 Datos de prueba estadística para las distintas pruebas	49
Cuadro 16 Datos de placa compresor de aire.....	66
Cuadro 17 Datos de placa controlador de temperatura	66
Cuadro 18 Datos de placa sensor de dióxido de carbono.....	66
Cuadro 19 Datos de placa flujómetros	66
Cuadro 20 Pesos iniciales de muestras a analizar	66
Cuadro 21 Propiedades de los materiales a utilizar	67
Cuadro 22 Condiciones de operación del sistema.....	67
Cuadro 23 Características de las partes del sistema de biodegradabilidad	67
Cuadro 24 Condiciones de compost a utilizar.....	67
Cuadro 25 Datos originales de producción de dióxido de carbono	68
Cuadro 26 Flujo requerido para alimentación del sistema.....	77
Cuadro 27 Dimensiones mínimas de la caja	77
Cuadro 28 Dimensiones captador de CO ₂	77
Cuadro 29 Producción de CO ₂ del PHA a lo largo de la prueba.....	78
Cuadro 30 Producción de CO ₂ del papel muestra No. 1 a lo largo de la prueba	79
Cuadro 31 Producción de CO ₂ del papel muestra No.2 a lo largo de la prueba	79

Cuadro 32	Producción de CO ₂ del papel muestra No.3 a lo largo de la prueba	80
Cuadro 33	Producción de CO ₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.1 a lo largo de la prueba..	80
Cuadro 34	Producción de CO ₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.2 a lo largo de la prueba..	81
Cuadro 35	Producción de CO ₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.3 a lo largo de la prueba..	81
Cuadro 36	Resultados de biodegradación de materiales en sistema de compostaje	82
Cuadro 37	Datos calculados de masa producida de dióxido de carbono	82
Cuadro 38	Datos de prueba estadística para las distintas pruebas	85

Índice de figuras

Figura 1	Estructura de monómero y polímero.....	8
Figura 2	Distintos tipos de ramificaciones de los polímeros.....	10
Figura 3	Ejemplo de polímeros naturales.....	11
Figura 4	Ejemplo de polímeros sintéticos.....	11
Figura 5	De dónde vienen los biopolímeros.....	12
Figura 6	Esquema de biodegradación de los plásticos.....	14
Figura 7	Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje.....	16
Figura 8	Ejemplo de sellos para identificar los productos.....	18
Figura 9	Estructura química del PHA.....	19
Figura 10	Estructura química de la celulosa.....	20
Figura 11	Proyección de acumulación de plásticos a nivel mundial.....	21
Figura 12	Flujómetro para alimentación de oxígeno.....	22
Figura 13	Vista de perfil del esquema del sistema de biodegradabilidad puesto en marcha en el laboratorio de operaciones unitarias.....	32
Figura 14	Planos de partes del sistema de biodegradabilidad puesto en marcha en el laboratorio de operaciones unitarias.....	33
Figura 15	Producción de dióxido de carbono de las muestras a lo largo de la prueba.....	48
Figura 16	Balance de masa de proceso de biodegradabilidad de materiales.....	64
Figura 17	Valores de t de student crítica con cola inferior.....	91
Figura 18	Muestra de papel periódico al inicio de la prueba.....	92
Figura 19	Muestra de papel periódico al final de la prueba.....	92
Figura 20	Muestra de PHA al inicio de la prueba.....	93
Figura 21	Muestra de PHA al final de la prueba.....	93
Figura 22	Muestra de bolsa biodegradable al inicio de la prueba.....	93
Figura 23	Muestra de bolsa biodegradable al final de la prueba.....	94
Figura 24	Producción de dióxido de carbono de las muestras resumidos.....	95
Figura 25	Datos de producción de dióxido de carbono para muestra de papel sin resumir.....	95
Figura 26	Datos de producción de dióxido de carbono para muestra de PHA sin resumir.....	96
Figura 27	Datos de producción de dióxido de carbono para muestra de bolsa biodegradable sin resumir.....	96
Figura 28	Sistema puesto en marcha en laboratorio de operaciones unitarias UVG.....	97
Figura 29	Frasco captador de dióxido de carbono.....	98
Figura 30	Frasco captador de dióxido de carbono con medidas.....	98
Figura 31	Frasco marca Kimax como sistema de degradación.....	98

Figura 32	Flujómetros vista frontal	100
Figura 33	Flujómetros vista trasera	100
Figura 34	Difusor de aire.....	101
Figura 35	Caja para baño térmico	101
Figura 36	Resistencias utilizadas.....	101
Figura 37	Controlador de temperatura	102
Figura 38	Manifold con 5 puertos de salida	102
Figura 39	Medidor de pH y humedad.....	103
Figura 40	Sensor de dióxido de carbono	104
Figura 41	Remote Loggin para sensor PASCO.....	104
Figura 42	Wireless devices para sensor PASCO.....	105
Figura 43	Sensores medidores de CO ₂ disponibles para conexión.....	105
Figura 44	Número de serie del sensor medidor de CO ₂	106
Figura 45	Sensores medidores de CO ₂ disponibles para configurar.....	106
Figura 46	Configuración de los sensores medidores de CO ₂	107
Figura 47	Sensor medidor de CO ₂ almacenando datos	107
Figura 48	Sensores con información guardada del sensor medidor de CO ₂	108
Figura 49	Forma para presentar datos del sensor medidor de CO ₂	108
Figura 50	Datos presentados como tabla y gráfica del sensor medidor de CO ₂	109
Figura 51	Menú de experimentación y opción para guardar datos del sensor medidor de CO ₂ ...	109
Figura 52	Distribución de la prueba de t de student.....	110

Lista de abreviaturas y siglas

1. **% m/m:** Porcentaje masa sobre masa
2. **ASTM:** American Society for Testing and Materials
3. **ASTM 5338:** American Society for Testing and Materials 5338
4. **C:** Carbono
5. **cm³:** Centímetros cúbicos
6. **CO₂:** Dióxido de carbono
7. **g/mol:** Gramos mol
8. **HCl:** Ácido clorhídrico
9. **K:** Potasio
10. **kg:** Kilogramos
11. **L/min:** Litros por minuto
12. **m³:** Metros cúbicos
13. **N:** Nitrógeno
14. **NaOH:** Hidróxido de sodio
15. **O₂:** Oxígeno
16. **pH:** Potencial de hidrógeno
17. **PHA:** Polihidroxialcanoatos
18. **PHB:** Polihidroxibutirato
19. **PBAT:** Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato)
20. **PBS:** Succinato de poli butileno
21. **PCL:** Policaprolactona
22. **PLA:** Ácido poliláctico
23. **T (°C):** Temperatura en grados Celsius
24. **VOC's:** Compuestos orgánicos volátiles

Agradecimientos

Este trabajo se lo dedico a:

A Dios y a la Virgen María, por guiarme a lo largo de esta etapa de mi vida, dándome la sabiduría y fortaleza necesarias para alcanzar esta meta tan importante.

A mis padres, por su incondicional apoyo a lo largo de este proceso. Gracias por brindarme las herramientas y la confianza para superar cada reto. Por ser siempre mi mayor ejemplo y motivación para esforzarme al máximo.

A mi hermana, mi guía y compañera en todas las etapas de mi vida. Gracias por estar siempre a mi lado, por tu apoyo incondicional, y por ser mi mejor aliada.

A Juan Pablo Lezana Curley, por compartir conmigo esta importante etapa de mi vida, brindándome tu apoyo constante. Gracias por estar a mi lado en cada paso de este camino, logrando juntos esta meta y muchas más por venir.

A Nicole Zuástegui Garzaro y a mis amigos, por estar siempre presentes, brindándome su apoyo y amistad. Han hecho que este trayecto sea más fácil y llevadero, y les agradezco por estar siempre a mi lado.

A mi familia, porque siempre están pendientes de mí, brindándome su amor, apoyo incondicional y palabras de aliento en cada paso del camino.

Al Ing. Luis Nuñez, mi asesor, por su dedicación, tiempo y orientación a lo largo de este proceso. Gracias por guiarme con su conocimiento y experiencia, y por su compromiso para que este trabajo se completara de la mejor manera.

Por último, a mis catedráticos a lo largo de esta carrera, gracias por todos los conocimientos que me han brindado y por compartir su pasión por el aprendizaje.

“Después de escalar una montaña muy alta descubrimos que hay muchas otras montañas por escalar” – Nelson Mandela

Resumen

El objetivo principal de este trabajo fue implementar el método estándar ASTM D5338 a escala laboratorio para evaluar la biodegradabilidad de materiales poliméricos bajo condiciones controladas de compostaje y poder aplicarlo en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Para esto se realizó el dimensionamiento y esquematización del equipo necesario según los estándares de la norma y se desarrolló una metodología que pudiera ser replicada, integrado por los siguientes equipos: flujómetros, frascos de sistema de biodegradación, frascos captadores de CO₂, sensores medidores de dióxido de carbono y un baño térmico. Además, se verificó el método con un polímero certificado como biodegradable y se determinó la biodegradabilidad de un polímero identificado de esa forma. En el caso del material certificado, el papel periódico alcanzó un 82.6% (m/m) de biodegradabilidad, mientras que la bolsa etiquetada como biodegradable y compostable, no mostró degradación, lo que resalta la importancia de contar con sistemas de certificación estrictos para mejorar los controles al respecto. Por otro lado, se determinó que debe ajustarse el tiempo de compostaje dentro del sistema según los requerimientos de los materiales como en el caso del PHA que alcanzó 14.6% (m/m) de biodegradabilidad, pero en los últimos días, la producción de dióxido de carbono iba en aumento. A pesar del buen desempeño del sistema con las muestras analizadas, se recomienda estudiar formas alternas de mantener la humedad dentro de los sistemas experimentales para asegurar el porcentaje de humedad en todo momento.

Abstract

The main objective of the work was to implement the standard method ASTM D5338 at a laboratory scale to evaluate the biodegradability of polymeric materials under controlled composting conditions and apply it in the unit operations laboratory at Universidad del Valle de Guatemala. To achieve this, the necessary equipment was sized and outlined according to the standards of the method, and a replicable methodology was developed, including the following equipment: flow meters, biodegradation system jars, CO₂ capture jars, carbon dioxide sensors, and a thermal bath. Additionally, the method was verified with a polymer certified as biodegradable, and the biodegradability of a polymer identified as such was determined. In the case of the certified material, newspaper reached 82.6% (m/m) biodegradability, while the bag labeled as biodegradable and compostable showed no degradation, highlighting the importance of strict certification systems to improve controls in this regard. Furthermore, it was determined that the composting time within the system should be adjusted according to the requirements of the materials, as in the case of PHA, which reached 14.6% (m/m) biodegradability, but carbon dioxide production was increasing in the final days. Despite the system's good performance with the analyzed samples, it is recommended to study alternative ways to maintain humidity within the experimental systems to ensure the moisture percentage at all times.

I. Introducción

Los polímeros etimológicamente significan “*poli*” que es muchos y “*meros*” que son unidades o partes. Es decir, son materiales macromoleculares sintéticos o naturales que se componen de muchas unidades individuales llamadas monómeros y poseen un set de propiedades únicas y diferentes. Son confundidos cotidianamente con los plásticos. Sin embargo, estos son un subconjunto de los polímeros. Los plásticos son polímeros que normalmente o con la ayuda de aditivos tienen un comportamiento mecánico que se define como “plástico” (Núñez, 2023).

Los plásticos biodegradables son materiales que pueden descomponerse por acción de microorganismos en condiciones adecuadas, transformándose en dióxido de carbono, agua y biomasa. Ocurre en un tiempo relativamente corto en comparación con los plásticos convencionales (Referencia documento de bioplásticos). Los plásticos compostables son un tipo de plásticos biodegradables que pueden descomponerse en un compost a condiciones controladas de temperatura y humedad (Biopolymers, 2022). El compost es el resultado de un proceso biológico de descomposición controlada de materia orgánica, realizado por microorganismos como bacterias, hongos y otros descomponedores en presencia de oxígeno (Amigos de la tierra, 2015).

El papel es un material delgado y plano que se fabrica de fibras vegetales, principalmente de madera o de otras fuentes como algodón. Se considera un material celulósico lo que significa que está compuesto principalmente por celulosa, que es el principal polímero estructural de las plantas. La celulosa es un polisacárido compuesto por largas cadenas de moléculas de glucosa (Casey, 1980). El polihidroxialcanoato poliéster alifático y biobasado que representa casi la mitad de todos los polímeros biodegradables, de origen sintético. Es un termoplástico que tiene propiedades similares al PE y PET y una buena resistencia (Farah et al., 2016). Es un copolímero que es un derivado del azúcar a base de almidón que viene de maíz, trigo o papa, modificado biológicamente por un proceso de fermentación bacteriana en ácido láctico (Vert, 2005).

La contaminación por plástica es uno de los principales problemas a nivel mundial. Estos plásticos convencionales, derivados de petróleo, tienen un tiempo de degradación extremadamente prolongado lo que genera una acumulación masiva de residuos en el medio ambiente. Pueden tardar cientos de años de degradarse, contribuyendo a la contaminación del suelo, cuerpos de agua y producción de dióxido de carbono al momento de su producción (Vásquez et al., 2013). Es por esto por lo que surge la necesidad de plásticos alternativos que sean biodegradables y compostables, diseñados para descomponerse más rápidamente y bajo condiciones específicas, como el compostaje controlado.

La American Society for Testing and Materials por sus siglas en inglés ASTM, es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios por

consenso, aplicables a materiales, productos, sistemas y servicios. La norma ASTM D5338 establece un método estándar para determinar la biodegradación aeróbica de plásticos en condiciones controladas de compostaje. Este método permite exponer los materiales a un ambiente de compostaje controlando la producción de dióxido de carbono como indicador de la biodegradación. Esta norma establece que un plástico es considerado biodegradable si produce al menos un 60% en peso de CO₂ del material original (ASTM D5338-98). En este sistema de compostaje los microorganismos metabolizan el carbono presente en los materiales liberando este gas como subproducto de la respiración aeróbica (Biopolymers, 2022).

Las tendencias y desinformaciones han hecho que en Guatemala los bioplásticos comiencen a impulsarse y legislarse como la solución a los problemas de contaminación de plásticos sin considerar factores como que no todos los biopolímeros son biodegradables y que la biodegradabilidad de un material no justifica un descarte indiscriminado en cualquier lugar o de cualquier forma. Además, en el mercado se tienen distintas resinas y productos terminados identificados como biodegradables, pero no tienen una referencia o certificación que verifique que cumpla con las normas para ser identificado como tal (Núñez et al., 2019).

II. Antecedentes

La preocupación por la contaminación plástica y su impacto ambiental ha sido un tema de creciente relevancia a nivel mundial teniendo efectos nocivos y altas emisiones de CO₂ principalmente en su proceso de obtención, ya que los plásticos tradicionales son derivados del petróleo. Los problemas ambientales en relación con los plásticos se basa en la composición química de lo que están fabricados y su tiempo de degradación. Una bolsa de plástico tarda alrededor de 10 a 20 años en degradarse y una botella de plástico alrededor de 250 años (Geyer et al., 2017). Sumado a todos estos problemas a nivel mundial para los años 2020 a 2030 se estima producir alrededor de 500 millones de toneladas y para el año 2050 alrededor de 1,200 millones de toneladas de resinas y fibras (PNUD, 2021). Las aplicaciones del plástico son infinitas y de uso indispensable para las personas, lastimosamente la mala gestión de estos residuos han provocado consecuencias no solo ambientales, si no sociales, económicas y políticas.

Guatemala no es la excepción a toda esta problemática si no al contrario, actualmente se ven los impactos ambientales derivados a esta mala gestión que han llegado a amenazar la salud de los ecosistemas y los seres vivos. Se estimó que en el año 2019 se produjeron 2,571,517 toneladas de desechos sólidos domiciliarios y de estos el 17% son residuos plásticos (Instituto Nacional de Estadística, 2019). La producción de plásticos no es algo que esté en disminución, si no se ve el aumento con los años de estos residuos debido a la mala gestión y falta de regulaciones para su producción. Debido a los problemas ambientales anteriormente mencionados se ha impulsado el uso de los plásticos biodegradables que pueden fabricarse a partir de recursos renovables o de combustibles fósiles, que por medio de la presencia de microorganismos y por las condiciones ambientales requeridas son capaces de llevar a cabo una biodegradación (Vázquez Morillas et al., 2013).

Además, en respuesta a la problemática que se tiene por la contaminación plástica y poder contar con soluciones sostenibles, la norma ASTM D5338 surge como un estándar clave para evaluar la biodegradabilidad de materiales poliméricos bajo condiciones controladas de compostaje. Este método se ha utilizado en diferentes contextos internacionales, ya que permite a investigadores y fabricantes a certificar que los polímeros ofrecidos como biodegradables cumplen con los requisitos para degradarse en un sistema controlado de compostaje. La implementación de esta norma ha generado confianza en los mercados que usan este estándar, como Estados Unidos, para sus productos biodegradables, favoreciendo la creación de regulaciones y normativas que aseguran la calidad y efectividad de estos.

Para nombrar un plástico como biodegradable según la norma D5338 se deben de seguir los parámetros del Cuadro No. 1.

Cuadro 1

Parámetros del estándar para considerarse como un plástico biodegradable y requerimientos de la experimentación.

Norma	Tipo de prueba	Duración de la prueba (días)	Nivel de degradación
ASTM 5338	Aeróbica	45	60%

Un polímero se considera como biodegradable al producir al menos un 60% en peso de CO₂ del peso original del material y 70% para el caso de la celulosa (ASTM 5338-98). Y cumplir con los requerimientos de concentraciones elementales presentes en el compost al terminar o iniciar el proceso.

Para Guatemala implementar el método ASTM D5338 representara un avance significativo, ya que permitirá validar y certificar de manera rigurosa los productos comercializados como biodegradables en el país. Esto no solo va a fortalecer la confianza de los consumidores sino que también alineará las prácticas locales con los estándares internacionales, facilitando la competitividad en los mercados globales y contribuyendo a la reducción del impacto ambiental causado por los plásticos no degradables.

III. Justificación

La contaminación por plásticos es una problemática ambiental crítica, con impactos globales que también afectan a Guatemala. Los plásticos convencionales debido a su resistencia a la degradación están presentes en el ambiente cientos de años, sin embargo, con el plástico ocurre que nunca termina de desintegrarse, ya que la mayoría de los materiales no son de origen orgánico y simplemente se van volviendo más pequeños conocidos como micro plásticos. Contribuyendo a la acumulación de residuos en suelos, océanos, representando una amenaza para la biodiversidad y la salud humana (Vázquez et al., 2013). En respuesta a esta crisis, la búsqueda de materiales biodegradables ha comenzado a tener más relevancia tanto en Guatemala como el mundo. Siendo uno de los principales desafíos en Guatemala la falta de certificación de los productos que se venden y están etiquetados como biodegradables, lo que genera incertidumbre en los consumidores, limita la implementación de soluciones sostenibles y al ser Guatemala un país exportador de muchos productos se cierra las puertas a mercados mundiales que ya tienen como requerimiento contar con un empaque biodegradable.

La norma ASTM D5338, que proporciona un método estándar para evaluar la biodegradabilidad de los materiales plásticos bajo condiciones controladas de compostaje y se utiliza para abordar esta problemática. Además, se usa ampliamente a nivel internacional, principalmente en Estados Unidos y países que usan el estándar ASTM para sus regulaciones ya que permite certificar productos biodegradables y promover la confianza en los mercados de productos sostenibles (Núñez et al., 2019). La implementación de este método representará un avance significativo en la validación científica de los productos ofertados como biodegradables, permitiendo que la industria local certifique sus productos conforme a la norma internacional.

Para la industria local la certificación de productos biodegradables abrirá puertas a nuevos mercados y aumentará la competitividad, permitiendo que las empresas guatemaltecas ofrezcan productos con garantías verificadas de biodegradabilidad (Núñez et al., 2019). Esto es crucial en un contexto global donde la demanda de productos sostenibles está en crecimiento. Para los consumidores brindará mayor transparencia y confianza a los productos que se compran para saber que cumplen con los criterios de biodegradación. Además, ayuda a que las regulaciones ambientales del país y a la creación de políticas públicas más efectivas para la gestión de residuos, alineando a Guatemala con los esfuerzos globales contra la contaminación por plástico.

Debido a la carencia de sistemas y/o entes que puedan realizar análisis de Biodegradabilidad de materiales y al interés de UVG en el campo de acción, en este trabajo se implementó el método estándar ASTM D5338 en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, el cuál es aplicable en la evaluación de la biodegradabilidad de materiales nombrados como tal y pueda ser usado a nivel local para analizar y clasificar materiales. Para

esto se dimensionó y esquematizó el equipo para desarrollar un sistema que cumple con los requisitos de la norma, de forma paralela se desarrolló una metodología que cumple con el estándar para ser aplicado a nivel laboratorio. Por último, se verificó el método desarrollado con estándar polimérico certificado como biodegradable y se determinó la biodegradación que tiene un polímero identificado dentro de esa categoría.

IV. Objetivos

A. Objetivo general

Implementar el método estándar ASTM 5338 utilizando equipo de laboratorio de operaciones unitarias para evaluar la biodegradabilidad de materiales poliméricos de la oferta local.

B. Objetivos específicos

- Dimensionar y esquematizar el equipo que se necesita para la implementación del método por medio de los estándares de la norma ASTM D5338, para desarrollar un sistema que cumpla con los requisitos.
- Desarrollar una metodología cumpliendo con el estándar ASTM D5338 de pruebas de biodegradabilidad, para ser aplicado a nivel laboratorio.
- Verificar el método desarrollado con un estándar polimérico certificado como biodegradable, por medio del equipo implementado para comprobar que el sistema funciona.
- Determinar la biodegradabilidad de un polímero nombrado como tal, en el mercado local utilizando el sistema estandarizado

V. Marco teórico

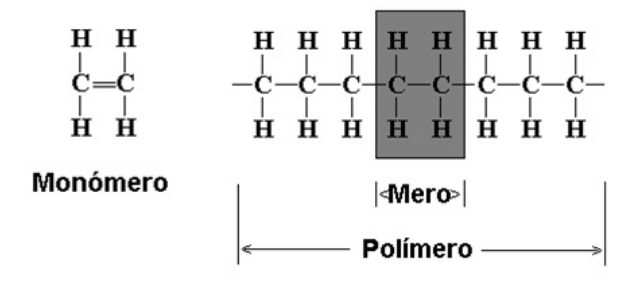
A. Polímeros

Etimológicamente los polímeros vienen de “*poli*” – muchos y “*meros*” – unidades o partes. Se consideran como materiales sintéticos o naturales que se componen de muchas unidades individuales (monómeros) y poseen un conjunto de propiedades únicas y diferentes. En la vida real son confundidos con los plásticos, sin embargo, estos son un subconjunto de los polímeros. Los plásticos son polímeros que normalmente o con la ayuda de aditivos tienen un comportamiento mecánico que se define como “plástico”. Todos los plásticos son polímeros, no todos los polímeros son plásticos (Álvarez, 2021). Si se ignoran los metales y los compuestos inorgánicos, prácticamente todo lo demás en este mundo son materiales poliméricos.

Los polímeros resultan de la unión de moléculas con masa molecular reducida y más simples llamadas monómeros a través de enlaces químicos tipo covalentes. Los polímeros pueden ser de origen natural o sintético, pero siempre son el resultado de un proceso llamado polimerización, en el cual fenómenos como la temperatura, el tiempo de reacción o la naturaleza de los monómeros determinan el largo de la cadena polimérica resultante. La polimerización es una reacción química por las cuales los reactivos y monómeros, compuestos de bajo peso molecular, forman enlaces químicos entre sí para dar lugar a una macromolécula, molécula de gran peso molecular ya sea de cadena lineal o de estructura tridimensional, denominada polímero (Raimond B. et al. 1995)

Figura 1

Estructura de monómero y polímero.



Nota. Tomado de Clayden et al., 2013

La disposición básica y secuencia de los monómeros en la cadena polimérica. Es el nivel más fundamental de la estructura de un polímero, donde los monómeros están unidos por enlaces covalentes, formando largas cadenas. La estructura de un polímero determina en gran parte sus propiedades físicas y químicas. Se tienen tres estructuras. La estructura primaria especifica la secuencia de átomos que constituyen la cadena de la macromolécula, puede ser la repetición de una solo unidad o puede tener unidades en una secuencia establecida. La estructura secundaria especifica la forma o conformación del polímero y la terciaria describe la configuración

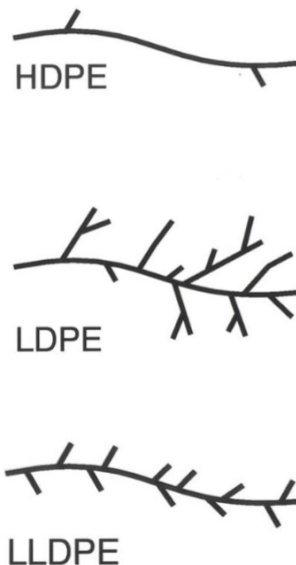
tridimensional que la molécula posee por el ambiente en el que encuentra y la estructura cuaternaria representa como las terciarias interactúan entre sí y es determinante en la funcionalidad de la molécula. En general la estructura influencia la denominada “memoria” de un polímero, esta implica que, bajo condiciones de energía adecuadas, el mismo se moverá hasta la configuración estérica más estable (Sayrmour, 2021).

Existen distintos tipos de polimerización y varios sistemas de clasificación. Las categorías principales son: Polimerización por adición es cuando la molécula de monómero pasa a formar parte del polímero sin pérdida de átomos, es decir, la composición química de la cadena resultante es igual a la suma de las composiciones químicas de los monómeros que la conforman. Por lo cual, durante la polimerización por adición no se generan subproductos. Una condensación es una policondensación, la molécula de monómero pierde átomos cuando pasa a formar parte del polímero. Por lo general, se pierde una molécula pequeña. Por lo cual, en las polimerizaciones por condensación se generan subproductos. Los polímeros obtenidos por esta vía se los denomina polímeros de condensación. También se tiene la polimerización de crecimiento en cadena en donde los monómeros pasan a formar parte de la cadena “uno a la vez”. Primero se forman dímeros, después trímeros, a continuación, tetrámeros, etc. De esta manera, la cadena se incrementa de uno en uno o, mejor dicho, de monómero a monómero. Por el tipo de cadena que tiene son de cadena lineal, radiales o ramificados. En la polimerización por crecimiento en etapas o pasos es posible que un oligómero reaccione con otros, por ejemplo, un dímero con un trímero, un tetrámero con un dímero, etc., de forma que la cadena se incrementa en más de un monómero. En la polimerización por crecimiento en etapas, las cadenas en crecimiento pueden reaccionar entre sí para formar cadenas aún más largas (Clayden et al., 2013).

Un polímero puede ser lineal (como el HDPE, polietileno de alta densidad) o ramificado (como el LDPE y LLDPE), dependiendo de cómo los monómeros se unen durante el proceso de polimerización. En los polímeros lineales como el HDPE, las cadenas de monómeros están dispuestas de manera ordenada, lo que da como resultado un material rígido y con alta resistencia. En contraste, en los polímeros ramificados como el LDPE, las cadenas laterales interfieren en el empaquetamiento de las cadenas principales, lo que genera un material más elástico y flexible. El LLDPE, aunque también es ramificado, tiene una estructura más controlada que permite obtener materiales transparentes y elongables. Estas diferencias estructurales permiten adaptar los polímeros a diferentes aplicaciones, como productos rígidos para el HDPE y películas plásticas o envases flexibles para el LDPE y LLDPE (Sayrmour, 2021).

Figura 2

Distintos tipos de ramificaciones de los polímeros



Nota. Tomado de Sayrmour 2021

Los polímeros son estructuras complejas vitales para la evolución de los seres vivos complejos, como el ADN, así como de sustancias industriales orgánicas sumamente versátiles como el plástico y otros derivados del petróleo. Por su origen se pueden clasificar como polímeros naturales que son de origen natural, provenientes de la naturaleza, también polímeros semisintéticos que se obtienen a partir de la transformación de polímeros naturales y los polímeros sintéticos que se obtienen industrialmente mediante el manejo de monómeros orgánicos. Según su estructura química pueden ser orgánicos cuya cadena principal de moléculas está compuesta principalmente por carbono, los orgánicos vinílicos presentan únicamente átomos de carbono en su cadena principal, aunque también pueden contener halógenos y estirenos en su estructura. También se tienen polímeros orgánicos no vinílicos presentan en su cadena principal oxígeno y nitrógeno además de átomos de carbono y los inorgánicos pueden estar basados en azufra o en silicio (Sherrington et al., 2016).

Figura 3

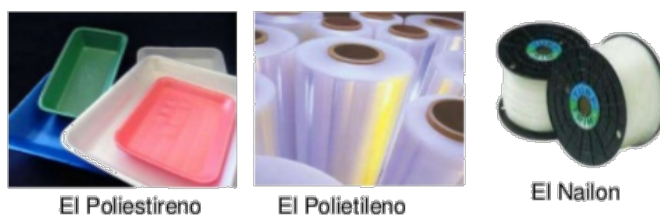
Ejemplo de polímeros naturales



Nota. Tomado de Bustamante, 2020

Figura 4

Ejemplo de polímeros sintéticos



Nota. Tomado de Bustamante, 2020

Los polímeros más abundantes del mundo naturales son celulosas que es el biopolímero del que está hecha la madera y el papel, el almidón que está compuesto por glucosa, la quitina que está en los exoesqueletos y proteínas que son polímeros naturales de aminoácidos. Los polímeros sintéticos son polietileno, que es el más producido en el mundo, el polipropileno que es usado por su resistencia química y térmica, PVC y poliestireno que sirve para envases. Los polímeros más usados tanto sintéticos como naturales tienen un gran uso debido a que son abundantes, tienen propiedades físicas y químicas específicas, como versatilidad en aplicaciones, facilidad de procesamiento y por los costos de producción (Shen et al., 2009). Los plásticos se consideran residuos inertes que prácticamente no sufren transformaciones físicas, químicas o biológicas, se mantienen siempre en el mismo estado. Si bien ser inerte es una ventaja para algunas aplicaciones, es una desventaja desde el punto de vista ambiental. Los plásticos inertes tienden a acumularse en los vertederos y en el medio ambiente porque no se descomponen fácilmente. Esto contribuye al problema de la contaminación plástica, ya que los plásticos inertes permanecen en el entorno durante períodos muy largos (DNest Agency, 2020).

B. Biopolímeros

Los biopolímeros son polímeros o macromoléculas que provienen de fuentes biológicas, es decir son producidos por organismos vivos dentro de él o por medio de su metabolización. Algunos biopolímeros son biodegradables lo que hace que se puedan descomponer naturalmente en el ambiente por acción de microorganismos. Un bioplástico constituye materiales de origen biológico hasta aquellos que son biodegradables, los cuales tienen propiedades distintas. Un plástico de origen biológico es aquel que ha sido producido por un ser vivo y puede ser procesado en alguna parte del ciclo de vida de este para tener un producto. No todos los plásticos de origen biológico son biodegradables (Van den Oever et al., 2017). El plástico biodegradable es aquel que se degrada por medio del contacto con microorganismos que se encuentran en la naturaleza. Estos materiales no son siempre de origen biológico y pueden ser diseñados químicamente para ser propensos a la degradación con microorganismos (ASTM D6400-99).

El plástico degradable es un plástico diseñado para sufrir un cambio relevante en su estructura química bajo ciertas condiciones específicas del ambiente en que se encuentra, no necesariamente se degrada por medio biológicos y el plástico que sufre degradación por procesos biológicos al colocarse en un medio con microorganismos activos (compost) y produce en el proceso dióxido de carbono, agua y otros compuestos (ASTM D6400-99).

Figura 5

De dónde vienen los biopolímeros



Nota. Tomado de *The Plastics Industry Trade Association (SPI) Bioplastics Division*, 2016

C. Degradación

La degradación comienza con el deterioro de los polímeros en el medio, donde influyen distintos factores (Gu et al., 2000). Se da una desintegración que es un proceso de rompimiento químico de enlaces que se ocasiona por aditivos y procesos oxidativos, este rompimiento de enlaces hace que una masa de plástico se rompa en partículas finas y de menor tamaño que el original (ASTM D6400-99). Los factores que influyen en esta degradación son los siguientes.

- Factores abióticos, que son los componentes que determinan el espacio físico en el que se desarrolla los organismos, como el agua, temperatura, pH o la radiación UV
- Factores bióticos, que son todos los seres vivos que tenemos, como las enzimas extracelulares capaces de comenzar la degradación de los polímeros o los biosurfactantes.
- Las características de los polímeros como la cristalinidad, flexibilidad, hidrofobicidad, grupos funcionales, peso molecular, mezclas, aditivos, etc.

(Bastioli, 1998)

Se tienen cinco tipos principales de degradación, en donde normalmente se degrada la superficie exterior y se va entrando a las capas más internas del polímero. Las cadenas de polímeros se pueden degradar por la rotura de sus enlaces centrales y laterales. La degradación implica una disminución de su peso molecular (Devi et al., 2016). Se tiene la degradación térmica que consiste en la degradación mediante la exposición a altas temperaturas tanto de forma directa como de forma indirecta, donde se rompen los enlaces covalentes de las cadenas de polímeros (Guaita et al., 1985).

- Foto degradación proceso parecido a la degradación térmica, pero ocurre a una velocidad más alta, y la alteración de los enlaces químicos de las moléculas se produce por la acción ultravioleta del sol (Rabek, 1994).
- Degradación hidrolítica que se da por contacto con agua, donde se produce una rotura de los enlaces hidrógeno intermoleculares y se rompen los grupos funcionales (Volova et al., 2010).
- Biodegradación que es la que se da por medio de microorganismos como bacterias y hongos mediante acciones físicas, químicas o enzimáticas. Para esto, deben sintetizar enzimas extracelulares que sean capaces de iniciar la rotura de las cadenas de polímeros y de transformarlos en compuestos que puedan ser asimilados por el organismo y transportados dentro de la célula y metabolizados (Eubeler, 2010).
- Oxidación mediante aditivos químicos donde se añaden ciertos aditivos que provocan que los polímeros sean más susceptibles a ser degradados (Jakubowicz, 2003).

Los polímeros no suelen ser biodegradables ya que tiene una gran estabilidad en la cadena central de carbono y enlaces cruzados de hidrógeno carbono baja solubilidad, alto peso molecular y son muy recalcitrantes. Estas propiedades influyen en que sean menos susceptibles a ser afectados por las condiciones del medio y en que los microorganismos no sean capaces de degradarlos

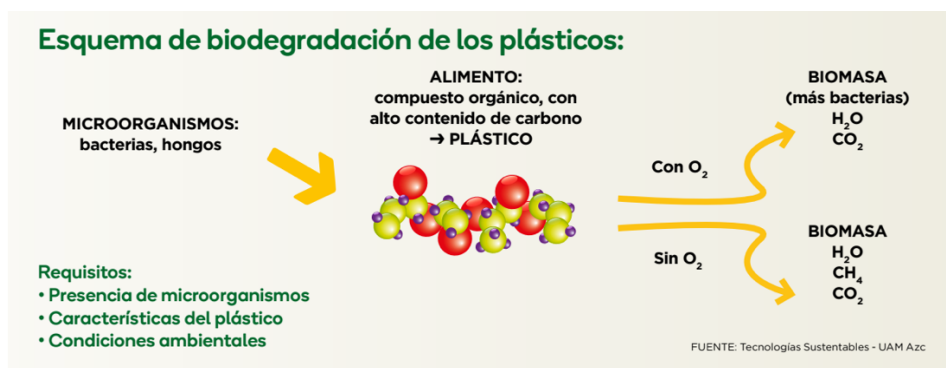
(Brazel y Rosen, 2012). Normalmente se usan aditivos para mejorar las propiedades de los polímeros, pero además de este uso se usan aditivos para facilitar la degradación y descomposición de estos. Se pueden añadir aditivos en el proceso de fabricación que actúan como catalizadores químicos, es decir, que varían la velocidad de la reacción química inclinándola hacia su rotura, facilitando la degradación (Jakubowicz, 2003). Sin embargo, la biodegradación de estos compuestos esta puesta en duda ya que no se tienen suficientes datos e investigaciones acerca de esto (Abdelmoez et al., 2021).

D. Biodegradación

La biodegradación es la disolución química de los materiales por bacterias u otros medios biológicos y de un polímero se da como la mineralización a dióxido de carbono, agua y la incorporación de sus productos de degradación en nueva biomasa por procesos naturales realizados por bacterias, arqueas y hongos, sin dejar residuos. Los polímeros se biodegradan de dos formas de forma aeróbica que se reduce dióxido de carbono, agua, biomasa y sales o de forma anaeróbica produciendo dióxido de carbono, metano, agua, biomasa y sales (Bastioli, 1998).

Figura 6

Esquema de biodegradación de los plásticos



Nota. Tomado de Tecnologías Sustentables

La biodegradación se puede dar en distintos medios:

- Biodegradación en agua: normalmente se realiza en agua dulce, la biodegradabilidad de los polímeros varía en función de la temperatura, el pH y de la presencia de nutrientes y microorganismos principalmente. En general, este medio tiene bajo potencial de biodegradación. En estos hábitats existen microorganismos con diferentes potenciales de biodegradación. Generalmente en ciertos ecosistemas de agua salada, los microorganismos son de menor tamaño y se encuentran en menor cantidad debido a una menor presencia de nutrientes y una mayor presencia de sales, cosa que afecta al potencial de biodegradación del medio (Eubeler, 2010).

- Biodegradación en el suelo: es un hábitat favorable para el desarrollo de microorganismos por lo que hay una gran biodiversidad. Las bacterias y hongos son los microorganismos que más proliferan. Estos microorganismos son capaces de biodegradar los polímeros ya que los materiales orgánicos resultantes de su biodegradación son una fuente de alimento para ellos. Los suelos presentan distintos tipos de hábitats por lo que en la biodegradación también van a influir los factores abióticos como la humedad del sustrato, temperatura, compactación, aireación, presencia de otros organismos y otras sustancias, etc. (Gardi y Jeffery, 2009)
- Biodegradación en compost: en este se usa un compost que viene de la capacidad de un material orgánico de transformarse en compost, se obtiene por biodegradación de una mezcla que consiste principalmente en restos vegetales, residuos, otros materiales orgánicos y tienen un contenido mineral limitado. Durante este proceso, los polímeros experimentan una degradación biológica a una rapidez similar a otros materiales compostables, sin generar residuos tóxicos. El compost, una vez es maduro, tiene una gran presencia de sustancias orgánicas y puede ser usado como fertilizante. Hay diversos factores que influyen en el proceso del compostaje: tamaño del material, relación carbono-nitrógeno, aireación del compost, humedad, temperatura, el pH, presencia de microorganismos, disponibilidad de oxígeno, etc., siendo la temperatura la más importante y la que decide el grado de madurez del compost final (Pace et al., 1995)

Cabe recalcar que los polímeros compostables son biodegradables en compost, pero esto no quiere decir que todos los polímeros biodegradables sean compostables, ya que pueden no alcanzar la velocidad de degradación o si dejan residuos tóxicos (Rudnik, 2019). Los aditivos biodegradables se agregan a los plásticos convencionales durante su proceso de extrusión o inyección para hacer que estos materiales, normalmente inertes, sean susceptibles a la biodegradación. Estos aditivos contienen compuestos orgánicos que atraen a microorganismos, facilitando la degradación en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Sin embargo, su eficacia depende del entorno (microbiano) en el que se depositen los plásticos tratados, como vertederos o compostaje industrial. Aunque aceleran la biodegradación, la efectividad real varía según las condiciones (Sanchez , 2021).

E. Compostaje

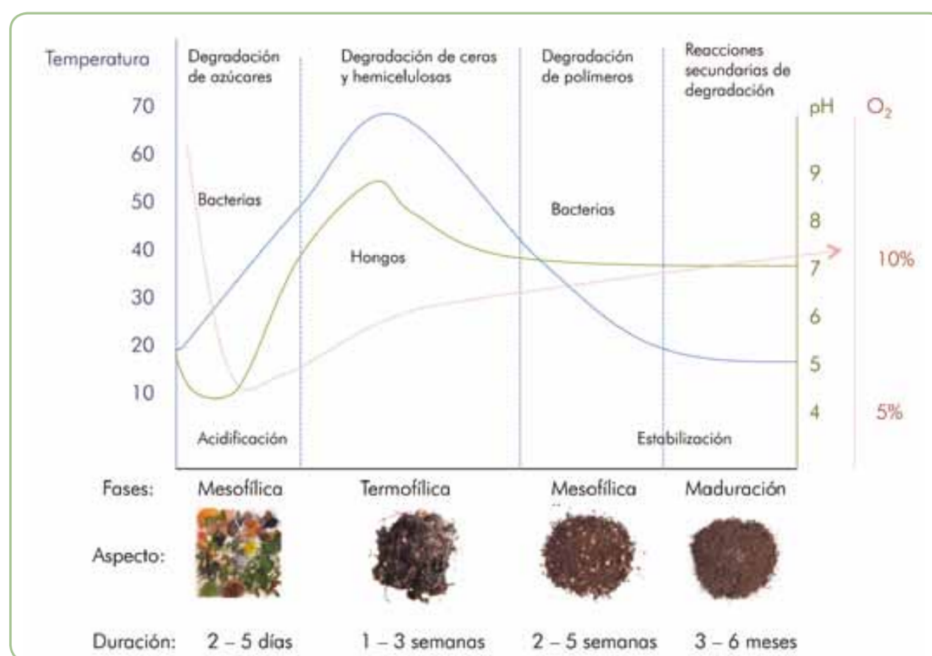
La compostabilidad es la capacidad de un material orgánico de transformarse en compost mediante el proceso de compostaje. Este proceso aprovecha la biodegradabilidad de los materiales orgánicos iniciales para transformarlos en un producto final que toma el nombre de compost. El compost por consiguiente es el fruto de la desintegración y biodegradación aeróbica (es decir en presencia de oxígeno) de material (por lo general residuos) orgánico: el compost maduro es parecido a un sustrato fértil y por su riqueza en sustancias orgánicas se utiliza como fertilizante (Ecozema, 2016). El compostaje es el proceso en el que la materia orgánica, como hojas y restos de comida, se descompone en el suelo. El compostaje es el proceso natural de reciclar materia orgánica, como hojas y restos de comida, en un valioso fertilizante que puede

enriquecer el suelo y las plantas. Todo lo que crece se descompone con el tiempo. Se acelera el proceso al proporcionar un entorno ideal para bacterias, hongos y otros organismos en descomposición. Los descartes orgánicos se pueden procesar en instalaciones de compostaje a escala industrial, en sistemas de compostaje comunitario de menor escala y en digestores anaeróbicos, entre otras opciones. El compostaje es una excelente manera de reciclar los desechos orgánicos que generamos en casa. Los restos de comida y los desechos de jardín (Composting, 2020). Para producir un compost sano y de buena calidad se debe controlar el pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total, materia orgánica total, nitrógeno total, fósforo total, potasio total, relación C/N, densidad aparente, contenido de humedad, capacidad de retención de agua y porosidad (Knight,1997).

El proceso de compostaje se lleva a cabo en varias fases, comenzando con la fase mesófila, donde los microorganismos descomponen los compuestos más fácilmente degradables a temperaturas moderadas. Posteriormente, en la fase termófila, la temperatura aumenta significativamente debido a la actividad microbiana, lo que permite la descomposición de materiales más complejos, como la celulosa, y asegura la eliminación de patógenos. Luego, el compost entra en una fase de enfriamiento, en la que la temperatura disminuye y los microorganismos mesófilos retoman su actividad para descomponer los residuos restantes. Finalmente, en la fase de maduración, el compost se estabiliza y se transforma en un material seguro y listo para ser utilizado en la mejora del suelo. Este proceso controlado garantiza la producción de un compost de alta calidad que puede ser utilizado para enriquecer el suelo y fomentar un crecimiento saludable de las plantas (Roman , 2013).

Figura 7

Temperatura, oxígeno y pH en el proceso de compostaje



Nota. Tomado de Roman 2013

La diferencia entre plásticos biodegradables y plásticos compostables implica tanto las condiciones de descomposición como los residuos finales. Los biodegradables se descomponen naturalmente por la acción de microorganismos, pero no necesariamente bajo condiciones específicas ni en un tiempo determinado. Pueden degradarse en distintos entornos, pero el proceso puede ser más lento y dejar residuos. Los plásticos compostables, en cambio, requieren condiciones controladas, como temperatura, humedad, y la presencia de oxígeno, típicas de un sistema de compostaje industrial, y deben descomponerse completamente en menos de 180 días sin dejar residuos tóxicos. Además, para ser considerado compostable, el material debe cumplir normas como la EN 13432 o la ASTM D6400, que garantizan que el plástico se transforme en CO₂, agua, y biomasa en condiciones de compostaje. Por otro lado, algunos plásticos biodegradables pueden no cumplir estos requisitos y tardar mucho más en descomponerse en ambientes naturales (Florez , 2023).

F. Normativa para biodegradabilidad

Debido a la preocupación a nivel mundial por el impacto ambiental que tienen los plásticos se han desarrollado distintas normas internacionales para evaluar y certificar la biodegradabilidad de materiales poliméricos. Las normas establecen criterios técnicos y metodológicos que permiten determinar el comportamiento de los plásticos bajo condiciones específicas, como compostaje industrial, biodegradación en suelos o entornos acuáticos. Se tienen a entes normativos que son organizaciones, generalmente de carácter público o privado, juegan un papel clave en la creación de métodos estandarizados para evaluar y certificar la degradación de materiales bajo diferentes condiciones ambientales. Los entes normativos que se tienen son DIN, EN y EU en Europa, ASTM en América, Jis en Asia e ISO como estándar internacional (Nuñez et al., 2019).

Cuadro 2

Estándares disponibles sobre biodegradabilidad de plásticos

	Europa	América	Asia	Internacional
Entes normativos	DIN, EN, EU	ASTM	JIS	ISO
Estándares para evaluación de Biodegradabilidad	DIN V 54900, EN 13432	ASTM D 6400	GreenPla certification	ISO

Nota. Tomado de Nuñez et al., 2019

La American Society for Testing and Materials por sus siglas en inglés ASTM, es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios por consenso, aplicables a materiales, productos, sistemas y servicios. Son un conjunto de principios elaborados por consenso con el objetivo de brindar un marco de calidad y competitividad aplicada a la investigación desarrollo y fabricación de productos de diversa índole. Son aceptadas a nivel mundial y su proceso de creación es totalmente abierto y transparente. Uno de los métodos más utilizados para evaluar la biodegradabilidad aeróbica de materiales plásticos es el desarrollado por ASTM, la cual tiene la norma D5338 el cual es un método de prueba estándar para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en condiciones controladas de compostaje. El

cual es un método equivalente de la norma ISO 14852. Este método de prueba determina el grado y la tasa de biodegradación aeróbica de materiales plásticos al exponerlos a un ambiente de compostaje controlado bajo condiciones de laboratorio. Este método está diseñado para producir resultados de prueba reproducibles y repetibles en condiciones controladas que asemejan las condiciones de compostaje. Las sustancias de prueba se exponen a un inóculo derivado de compost proveniente de residuos sólidos. El compostaje aeróbico se lleva a cabo en un ambiente donde la temperatura, la aireación y la humedad se monitorean y controlan de manera estricta. Este método de prueba está diseñado para proporcionar un porcentaje de conversión del carbono en la muestra a dióxido de carbono (ASTM 5338-98).

Figura 8

Ejemplo de sellos para identificar los productos



Nota. Fuente: (Green World DMD, 2024)

La relación entre la producción de dióxido de carbono y la biodegradabilidad de un plástico biodegradable en pruebas de compostaje se basa en la descomposición de los materiales orgánicos por microorganismos. Cuando un material se expone a un ambiente de compostaje los microorganismos que se encuentran presentes metabolizan el carbono contenido en el material como fuente de energía. En este proceso se da la descomposición de las cadenas de polímeros, liberando dióxido de carbono como subproducto de la respiración aeróbica. Es decir, la cantidad que se genera de CO₂ está directamente relacionada con la cantidad de carbono que se tiene en el material en descomposición dentro del sistema. Cuando se realizan estas pruebas los plásticos se comparan con un material de referencia conocido como biodegradable, comúnmente celulosa. Al tener cantidades similares entre el CO₂ producido por el plástico y el material de referencia se confirma la capacidad de biodegradarse. Además, la uniformidad de los datos Mantener los materiales en la misma forma asegura que las condiciones a las que están expuestos (temperatura, oxígeno, humedad) sean uniformes a lo largo del ensayo. Esto permite que el proceso de biodegradación sea consistente y que los resultados no se vean afectados por variables como la compactación o la falta de acceso al oxígeno en ciertas áreas. (Leja, K., & Lewandowicz, 2010). La producción de dióxido de carbono en sistemas de biodegradación va de 200 partes por millón hasta 10,000 (Naba Kumar , 2021).

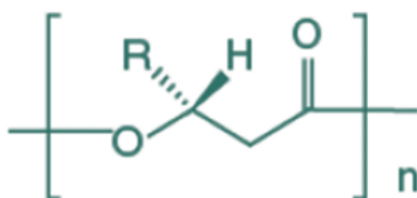
G. Polímeros biodegradables

Los polímeros biodegradables más usados son los poliésteres alifáticos, son de los pocos polímeros de alto peso molecular que son biodegradables. De manera general la biodegradación comienza por la rotura de los enlaces éster mediante hidrólisis enzimática, lo que forma oligómeros que provoca un cambio en la masa y posteriormente se degradan a unidades más

pequeñas solubles en agua y una disminución de peso seguida de una mineralización (Albertsson y Varma, 2002). Entre los polímeros biodegradables se encuentra:

- **Ácido poliláctico (PLA):** poliéster alifático y biobasado que representa casi la mitad de todos los polímeros biodegradables, de origen sintético. Es un termoplástico que tiene propiedades similares al PE y PET y una buena resistencia (Farah et al., 2016). Es un copolímero que es un derivado del azúcar a base de almidón que viene de maíz, trigo o papa, modificado biológicamente por un proceso de fermentación bacteriana en ácido láctico. Se polimeriza mediante un proceso de polimerización con apertura de anillo y su estructura puede ser fácilmente modificada para dar mezclas de los isómeros L o D para producir polímeros amorfos o cristalinos de alto peso molecular. Este tipo de polímero tiene la desventaja de ser sensible al calor ya que se deforma con la temperatura mayor a 60°C y con un punto de fusión de 180°C. (Vert, 2005).
- **Polihidroxicanoatos (PHAs):** son poliésteres lineales de hidroxialcanoatos producidos y almacenados en forma de gránulos por microorganismos mediante fermentación bacteriana de azúcares y lípidos en condiciones especiales de baja disponibilidad de nutrientes (Williams y Pueblos, 1996). Son insolubles en agua, tienen una alta cristalinidad y muchas propiedades que les permite sustituir a algunos de los polímeros convencionales las bacterias que los degradan contienen enzimas extracelulares capaces de degradar a los polímeros en los monómeros originales, como la PHB hidrolasa o la PHA depolimerasa (Jendrosseck y Handrick, 2002). Los PHA tienen características físicas similares a las de los plásticos derivados del petróleo, como el polipropileno y olietileno, pero tienen la ventaja de que pueden ser sintetizados a partir de fuentes de carbono renovables, son biodegradables (pueden ser asimilados por muchos microorganismos ya sea de suelos, mares, lagos o aguas residuales) y son biocompatibles (no causan efectos tóxicos). Estas propiedades les confieren una gran importancia como substitutos de los plásticos convencionales (Anderson y Dawes 1990).

Figura 9
Estructura química del PHA

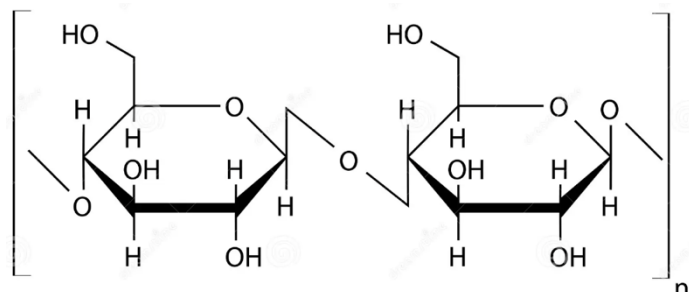


Nota. Tomado de Andler y Díaz, 2013

- Polímeros a base de almidón: es un polímero modificado de almidón y por sí solo puede usarse para fabricar polímeros termoplásticos biodegradables como el almidón termoplástico (TPS). Es altamente hidrofílico y sus propiedades no son tan buenas por lo que no se emplea en procesos normales que tienen otros plásticos, si no se usa como un aditivo (Jayasekara et al., 2005).
- Polímeros a base de celulosa: es un polímero derivado de la glucosa que se obtiene de un material lignocelulósico (celulosa y lignina) extraído de la madera procesada, a partir de residuos agrícolas y del papel reciclado (Chen et al., 2012). La celulosa, concretamente el polvo de celulosa microcristalina es el material de referencia utilizado para comparar con el material de ensayo en la mayoría de los ensayos de biodegradación (Jayasekara et al., 2005).

Figura 10

Estructura química de la celulosa



Nota. Fuente: tomado de Wade, 2017

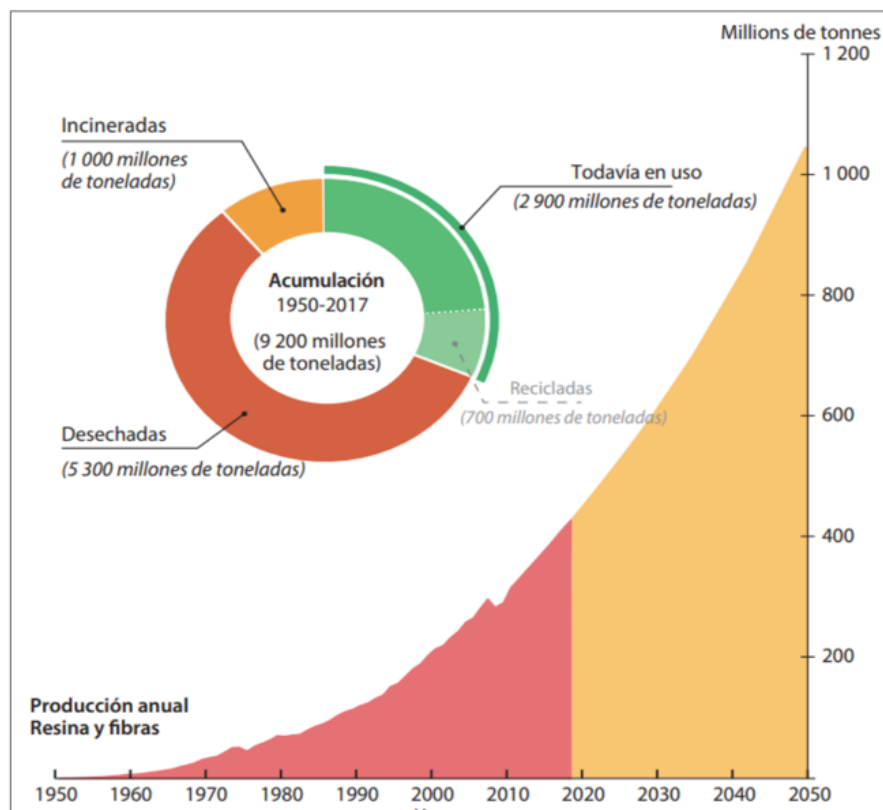
- Policaprolactona (PCL): poliéster alifático biodegradable de origen fósil, presenta propiedades similares al polietileno de baja densidad (LDPE) y se suele usar en mezclas con PLA o almidón por las propiedades que les otorga como la resistencia a la humedad o la plastificación. Hay una gran variedad de microorganismos que pueden biodegradarlo y se encuentran en abundante cantidad en todos los medios (Leja y Lewandowicz, 2010).

H. Impacto en Guatemala y el mundo

En Guatemala y en el mundo se ve la masiva producción de plásticos. Esto ha provocado que la generación de más producción de desechos plásticos que de manera directa o indirecta llegan a los océanos, en el año 2022 la producción mundial alcanzo los 390 millones de toneladas. Se puede observar que la producción y proyección a nivel mundial de acumulación de plásticos aumenta hasta alrededor de 1,000 millones de toneladas para el año 2025.

Figura 11

Proyección de acumulación de plásticos a nivel mundial



Nota. Tomado de GRID-Arendal. PNUD, 2021

Debido a la problemática de los plásticos surgen distintas medidas para promover soluciones ligadas al uso responsables de recursos, también el uso de plásticos biodegradables. Las tendencias y desinformaciones han hecho que en Guatemala los bioplásticos comiencen a impulsarse y legislarse como la solución a los problemas de contaminación de plásticos sin considerar factores como que no todos los biopolímeros son biodegradables y que la biodegradabilidad de un material no justifica un descarte indiscriminado en cualquier lugar o de cualquier forma. Además, en el mercado se tienen distintas resinas y productos terminados identificados como biodegradables, pero no tienen una referencia o certificación que verifique que cumpla con las normas para ser identificado como tal (Núñez et al., 2019).

En varios países, se están impulsando normas y regulaciones que promueven el uso de plásticos biodegradables y exigen que estos productos estén correctamente identificados para asegurar su trazabilidad y compostabilidad. Estas leyes buscan reducir la contaminación plástica, exigir que los plásticos biodegradables cumplan con ciertos estándares internacionales, y que su degradación ocurra en un tiempo determinado y en condiciones controladas, como en compostaje industrial. Además, se están promoviendo etiquetados claros que diferencien los plásticos biodegradables de los convencionales (Parker, 2022).

I. Flujómetros

Un medidor de caudal es un aparato que se coloca en las líneas por donde se mueve un fluido para obtener la velocidad o el caudal de la materia que está fluyendo. los medidores disponibles en el mercado pueden medir flujos desde varios mililitros por segundo (ml/s) para experimentos precisos de laboratorio hasta varios miles de metros cúbicos por segundo (m³/s) para sistemas de irrigación de agua o agua municipal o sistemas de drenaje. Para una instalación de medición en particular, debe conocerse el orden de magnitud general de la velocidad de flujo, así como el rango de las variaciones esperadas (Catedras, 2018).

Figura 12

Flujómetro para alimentación de oxígeno



Nota. Fuente: tomado de Cátedras, 2018.

J. Medidores de dióxido de carbono

El CO₂ se mide en partículas por millón. Esta medición puede llevarse a cabo con diferentes dispositivos que analizan el aire y dan una indicación de la concentración de CO₂ en la sala (Belio, 2021). La tecnología más fiable para realizar estas mediciones es la NDIR, basada en la luz infrarroja. La empresa PASCO, ofrece medidores de dióxido de carbono compensado por temperatura y puede operar en ambientes con alta humedad. Utiliza datos en tiempo real para hacer que laboratorios clave, como los experimentos de fotosíntesis, respiración celular y metabolismo, sean atractivos y efectivos. Con la capacidad de almacenar más de 55,000 puntos de datos, este sensor permite realizar estudios durante la noche o incluso todo un fin de semana, lo que lo hace ideal para investigaciones a largo plazo sobre el ciclo del carbono (PASCO, 2024).

VI. Metodología

Cristalería

- 5 frascos marca Kimax de dos litros cada uno

Instrumentos

- Manifold con 5 puertos de salida de 0.635 cm (¼ in)
- 5 flujómetros de oxígeno de 0 a 15 L/min marca Gastek
- 5 botes captadores de CO₂
- Caja plástica
- Resistencia de 0.75kW
- Resistencia de 0.40 kW
- Manguera de 0.64 cm (¼ in)
- Manguera de 1.27 cm (½ in)
- Manguera de 0.48 cm (3/16 in)
- Difusor de aire de 2.5 cm
- Tamiz con malla 10 (abertura de 0.2 cm)

Equipo

- 5 sensores inalámbricos medidores de CO₂ marca PASCO, modelo PS-3208
- Controlador de temperatura marca
- Medidor de pH y humedad

Materiales

- Inoculo de compost
- Papel periódico
- Polihidroxialcanoatos (PHA)
- Bolsa biodegradable

Software

- SPARKvue
- Microsoft Excel

Implementación de equipo desarrollado

1. Conectar manifold con 5 salidas de conector de manguera de 0.635 cm (¼ in) al suministro de aire
2. Preparar los siguientes materiales
 - a. 5 frascos Kimax de 2 L

- b. 5 conectores de manguera de 0.476 cm (3/16 in)
 - c. 5 conectores de manguera de 1.27 cm (½ in)
 - d. 5 difusores de aire de 2.5 cm
3. Quitarles los tapones a los frascos y con cuidado abrir dos agujeros del tamaño de los conectores de manguera, asegurarse de hacerlos dentro del sello que tiene el tapón
 4. Colocar los conectores en su respectivo agujero y sellarlos con silicón
 5. Al tener todos los tapones listos, colocar la manguera interna de 0.476 cm (3/16 in) y conectar los difusores de aire, asegurando que la manguera quede dentro del frasco y con suficiente longitud para abrir los frascos
 6. Proceder a colocar los tapones en los frascos y preparar los siguientes materiales
 - a. Mangueras
 - b. Fluómetros
 - c. Frascos Kimax
 - d. Frascos captadores de CO₂
 - e. Caja plástica
 - f. Controlador de temperatura
 - g. Resistencia de 0.40 kW
 7. Colocar dentro de la caja plástica los frascos Kimax
 8. Acomodar el sistema de flujómetros y los frascos captadores de CO₂ de manera que queden cerca de los frascos, pero no dentro de la caja
 9. Luego colocar piedras sobre este difusor para que no caiga la tierra sobre él y lo tape.
 10. Al tener acomodado el sistema de frascos y flujómetros comenzar a colocar las mangueras respectivamente de manera que se conecte el manifold con los flujómetros, los flujómetros con los frascos y los frascos con los frascos captadores de CO₂. Rotular cada una de las mangueras y frascos respectivamente.
 11. Al tener conectado todo el sistema y rotulado, asegurarse que el equipo este completamente sellado y no tenga ninguna fuga de aire
 12. Revisar que se tenga un flujo constante de aire en la salida, colocar la resistencia en el soporte de manera que solo la resistencia quede dentro de la caja plástica. Conectar el controlador de temperatura a la electricidad y conectar la resistencia al controlador hasta que se comience con la experimentación.

Metodología de experimentación

A. Preparación de inóculo

1. Recibir el compost y asegurarse que tenga al menos 4 meses de antigüedad y medirle los siguientes parámetros
2. Con el medidor de pH y temperatura medir que el pH este neutro (7) y que la humedad este en 50% (5)
3. Luego colocar compost en el tamiz para asegurarse que tenga un tamaño de partícula mayor a 2 mm

B. Preparación de muestras

Las muestras de papel y papel periódico se preparan en triplicado para poder ser analizadas y obtener la estadística deseada.

1. Las muestras deben de ser del mismo tamaño y forma por lo que se realiza lo siguiente
2. Se corta el papel en un tamaño de 5 x 16.5 cm para que sirva de muestra para los otros materiales y se pesan pedazos del mismo tamaño hasta llegar a los 10 gramos
3. Al tener el papel pesado se humedece para que sea más fácil colocarlo dentro del sistema
4. Luego se pesan 10 gramos de muestra de PHA y se coloca en un molde del mismo ancho que el papel.
5. Se lleva al esto para convertirlo en una plancha.
6. Encender el horno hasta que se derrita y obtener una lámina uniforme.
7. Al salir esta lamina verificar que el peso sea el deseado
8. Por último, calentar muestra de bolsa biodegradable hasta que esta reduzca su tamaño y dejarla en forma de lámina al igual que el PHA y el papel
9. Cortarla hasta lograr pesar 10 gramos de esta
10. Dividir en 3 la plancha de muestra para ser colocada dentro del sistema

C. Análisis de muestras

1. Con el equipo, el compost y las muestras listas, llenar los frascos con el compost y muestra
2. Primero poner una base de 300 gramos y luego colocar el primer pedazo de papel
3. Luego colocar 100 gramos de compost y colocar el segundo pedazo de papel
4. Por último, colocar 100 gramos más de compost, el tercer pedazo de papel y 100 gramos más de compost. Buscando que las muestras queden bien distribuidas en el frasco y compost
5. Repetir los pasos del 2 al 4 para los siguientes materiales
6. Preparar un frasco únicamente con inóculo de compost sin muestra, pero con la misma cantidad total, es decir si se tienen 10 gramos de muestra, este frasco tendrá 610 gramos de inóculo de compost. Este frasco sirve como blanco
7. Llenar la caja de agua y colocar los frascos dentro de esta, tratando de que el nivel de agua sea lo más alto posible
8. Rotular los sensores de CO₂ y encenderlos para conectarlos con el software SPARKvue, por medio de bluetooth.
9. Colocar los sensores de CO₂ en la salida de los frascos respectivos, que estarán tomando datos cada minuto, es importante que estos estén cargándose durante toda la prueba para lograr almacenar los datos.
10. Colocar la resistencia en el soporte y colocarla dentro de la caja con agua, asegurarse de que esta no este pegada a la caja para que no se derrita.
11. Dejar el primer día a 35°C el sistema, luego durante los próximos cuatro días subir la temperatura a 58°C.
12. Comprobar las concentraciones de CO₂ en el aire de salida al menos diariamente durante la primera semana y luego en un intervalo mínimo de 6 horas.
13. Comprobar el flujo de aire diariamente antes de los recipientes de compostaje y en las salidas, asegurándose de que no haya fugas en el sistema completo.

14. Luego de los cuatro días reducir la temperatura a 50°C y dejarlo así hasta el día 28.
15. Después de este tiempo bajar la temperatura a 35°C hasta el final de la prueba que es hasta los 45 días
16. Agitar los recipientes al menos una vez por semana
17. Si se realizan ajustes, entonces las concentraciones de CO₂ deben controlarse de cerca durante las siguientes 72 horas y medirse al menos dos veces al día con un intervalo de tiempo de más de 6 horas

D. Configuración de sensores captadores de CO₂ para guardar datos

1. Se coloca en una computadora el software Sparkvue, también se puede abrir desde el navegador
2. Encender uno de los sensores, identificando bien a que muestra corresponderá
3. Al tener el sensor encendido y el software abierto, seleccionar “Remote logging” y ahí aparece “Sensors available for logging” (ver Figura 41 y 42) se despliega el menú de “Wireless Devices” y en este menú se selecciona el apartado de bluetooth
4. Selecciona correctamente el sensor que uno quiere según los que aparecen disponibles para conectarse (ver Figura 43) y el número de identificación (ver Figura 44)
5. Al seleccionar el sensor aparece un menú en donde aparecen los sensores disponibles para almacenar los datos (ver Figura 45), al seleccionar el sensor adecuado se escoge la configuración que este va a tener durante la prueba (ver Figura 46)
6. Escoger que se lean datos cada minuto y que el sensor este encendido para la configuración de lectura
7. Al terminar de configurar el sensor cerrar la pestaña y sale cuadro donde dice que el sensor esta almacenando los datos (ver Figura 47)
8. Luego el sensor se coloca dentro del captador de CO₂, asegurarse que el sensor tenga la luz amarilla encendida que es significa que está guardando datos
9. Esto se repite con cada una de las muestras, y asegurarse de identificar bien los sensores según la muestra que se está analizando con cada uno para descargar bien los datos.
10. Los sensores deben de estar conectados todo el tiempo para guardar los datos

E. Finalización de prueba

1. Al haber pasado 45 días se apaga el aire, se desconecta la resistencia y las mangueras de los frascos
2. Se apagan los sensores y se proceden a descargar los datos
3. Se procede a vaciar los frascos y ver el material que queda dentro de cada frasco
4. Separar el compost del material y proceder a pesar los materiales para determinar su peso final, es importante que, para esto los materiales estén completamente secos, como se colocaron inicialmente
5. Tirar el compost y anotar el peso final de las muestras
6. Con los datos descargados y el peso final se procede a realizar los análisis de datos para ver la degradación de los materiales

F. Configuración de sensores captadores de CO₂ para descargar datos

1. Luego que se termina el experimento, se enciende nuevamente el software y se procede a seleccionar la opción de “Sensors available for logging” en donde se selecciona la opción de descargar datos del sensor según el número de identificación (ver Figura 48)
2. Se abre una gráfica con los datos, en esta se puede cambiar el nombre y como se quieren presentar los datos. Se escogen las opciones que uno quiere (ver Figura 49) por ejemplo tabla y gráfica (ver Figura 50)
3. Al tener esto se selecciona en el menú (ver Figura 51) la opción de exportar datos y se crea un archivo “csv” que ya se puede abrir en Excel
4. También se selecciona la opción de guardar que guarda el archivo en “spklab” para volver abrirlo en el software
5. Esto se realiza con cada uno de los sensores y es importante que estén bien identificados cada sensor para no confundir los datos y los archivos
6. Con los datos ya guardados se procede a analizar los datos.

G. Metodología para cálculo de producción de CO₂

1. Con los datos obtenidos por cada uno de los sensores se agrupan en un Excel según cada muestra que se tuvo
2. También se guardan los datos que se obtuvieron del blanco
3. Se realizan los siguientes cálculos
 - a. Diferencia de la concentración de CO₂ producida por la muestra menos la del blanco, lo que nos da la concentración real de la muestra
 - b. Luego se multiplica por el flujo de aire que se tuvo durante toda la experimentación que fue de 6 litros por minuto, que nos da la liberación de CO₂ en mg/min
 - c. Los datos se tomaban cada minuto por lo que se multiplica la liberación de CO₂ que se tiene por este tiempo y se obtiene la masa producida de CO₂
 - d. La masa obtenida anteriormente se da en miligramos por lo que se hace el cálculo para que este en gramos
4. Los datos ya calculados se agrupan por grupos de días para poder presentarlos y analizar el cambio que se tiene a lo largo del tiempo

H. Cálculos

Por medio de los datos brindados por el sensor

- **Cálculo 1.** Concentración real de CO₂ con base en el CO₂ del blanco de la muestra

Para determinar la masa producida de CO₂ se utiliza la concentración que presenta la muestra y el blanco. Se usa como ejemplo la muestra de papel el dato del 09 de mayo de 2024 a la 1:45:50

$$C_{CO_2r} = C_{CO_2m} - C_{CO_2b}$$

Donde:

C_{CO_2r} = Concentración de dióxido de carbono real

C_{CO_2m} = Concentración de dióxido de carbono de la muestra

C_{CO_2b} = Concentración de dióxido de carbono del blanco

- **Cálculo 2.** Liberación de CO₂ de la muestra

Para saber la liberación de CO₂ que tiene la muestra se utiliza el flujo empleado durante la prueba y la concentración de real de dióxido de carbono

$$L_{CO_2} = C_{CO_2r} \times F_p$$

Donde:

L_{CO_2} = Liberación de dióxido de carbono

C_{CO_2r} = Concentración de dióxido de carbono real

F_p = Flujo de alimentación durante la prueba

- **Cálculo 3.** Masa de CO₂ producida de la muestra

Con el tiempo que tenía para la obtención de muestras que se establece en el software se obtiene la más producida

$$m_{CO_2} = L_{CO_2} \times \Delta t$$

Donde:

m_{CO_2} = masa de dióxido de carbono producida

L_{CO_2} = Liberación de dióxido de carbono

Δt = cambio de tiempo de toma de muestras

Por medio de los datos del peso de las muestras

- **Cálculo 4.** Porcentaje de biodegradabilidad de la muestra

Con el peso inicial de las muestras y el peso final que estas presentan, se encuentra por medio de la diferencia la masa producida y el porcentaje de biodegradabilidad. Tomando como ejemplo la muestra de papel

$$P_B = (M_0 - M_f) \times 100$$

Donde:

P_B = Porcentaje de biodegradabilidad

M_0 = Masa inicial de la muestra

M_f = Masa final de la muestra

VII. Resultados

A. Dimensionamiento y esquematización del equipo

Para la implementación del equipo según la norma fue necesario tomar en cuenta las siguientes partes y definir las especificaciones de cada uno de los componentes del sistema

Cuadro 3

Dimensionamiento de equipo necesario para implementación de sistema según requerimientos

Equipo		Especificaciones	Justificación
Flujómetros		8.5 L/min	Debido al cálculo 3 del apéndice sección E y tener tasas de flujo de aire lo suficientemente altas para garantizar que los niveles de oxígeno y poder medir el CO ₂ producido
Fracos captadores de CO ₂	Alto	27.0 cm	Se debe lograr desarrollar el aire y para esto se necesita 8 veces el diámetro del sensor
	Entrada	1.27 cm (½ in)	Para poder lograrlo imprimir no podía escoger un tamaño de manguera muy pequeño
	Diámetro total	11.0 cm	Para poder estar dentro de la impresora 3D y cumplir con el diseño que se buscaba de tener una forma de balón aforado
	Forma	Balón aforado	Distribución uniforme del gas, evitando acumulaciones. Además la forma esférica es ideal para soportar presiones internas moderadas sin deformarse.
Deposito de agua (baño térmico)		25.0 x 65.0 x 27.0 cm	Para que quepan los 5 frascos según su diámetro y como máximo puede tener esa altura la caja por el alto de los fracos. Esto se puede ver en el cálculo 4
Difusores de aire		3.0 cm	Como maximo pueden tener ese ancho o diámetro ya que el diámetro de abertura del frasco es de 3.5
Manifold	Puertos de salida	5	Se requiere alimentar a 5 frascos dentro del sistema
	Conectores manguera	0.635 cm (¼ in)	La entrada de los flujómetros es de ese tamaño por lo que la manguera para conectarlos debe de ser de ese tamaño
Resistencias		0.75 kW	Para poder llegar a la temperatura de de 50 y 58°C que va requerir el sistema
		0.40 kW	Para poder llegar a la temperatura de 35°C que va a requerir el sistema

Mangueras		0.64 cm (¼ in)	Para poder conectar el manifold con los flujómetros y los flujómetros con la entrada a los frascos de sistema
		1.27 cm (½ in)	Para poder conectar la salida de los frascos del sistema con la entrada del frasco captador de CO ₂
		0.48 cm (3/16 in)	Para poder conectar el conector de manguera interior del frasco con el difusor de aire que tiene este tamaño de entrada
Frascos	Tamaño	2.0 L	Según el tamaño recomendado por la norma ASTM D5338
	Tapón con conectores de manguera	0.64 cm (¼ in)	Para conectar flujómetros con el frasco y el flujo de aire con el difusor de aire
		1.27 cm (½ in)	Para conectar el frasco con la entrada del frasco captador de CO ₂
Sensores inalámbricos medidores de CO₂		De 0 a 10,000 mg/L (ppm)	Según literatura es lo que puede llegar a producirse de CO ₂ al biodegradarse materiales en condiciones de laboratorio
Controlador de temperatura		30 a 65°C	Se necesita un controlador que pueda llegar a estos rangos de temperatura para poder tener las condiciones en el sistema
Medidor	pH	7 (neutro)	Se requiere un pH y humedad neutra en el sistema para que el compostaje no se vea afectado
	Humedad	50%	
Tamizador		Malla 10	El compost debe de tener un tamaño de partícula mayor a esto para poder estar en el sistema según la norma ASTM D5338

Nota. La mayoría de requerimientos se dan por medio de la norma ASTM D5338, las dimensiones de los equipos utilizados y los cálculos se muestran en el apéndice sección E

La configuración del sistema garantiza que los resultados obtenidos sean comparables y aceptados internacionalmente, permitiendo validar la biodegradabilidad según criterios estandarizados. Los componentes seleccionados, como el frasco del sistema, los sensores de dióxido de carbono y sistemas de control térmico, aseguran un monitoreo preciso y continuo de las variables clave del proceso.

Con las especificaciones anteriormente mencionadas se esquematiza el equipo, se pone en funcionamiento en el laboratorio de operaciones Unitarias de la Universidad del Valle

Cuadro 4

Condiciones de operación

Parámetro	Valor
Flujo (L/min)	6
Humedad	50%
pH	7 (neutro)

Cuadro 5

Definición de partes del sistema de biodegradabilidad

Identificador	Nombre del equipo	Marca	Características
A	Sensores de CO ₂	PASCO	Rango de 0 a 100,000 mg/L
B	Frascos captadores de CO ₂	N/A	29.0 x Ø11.0 cm
C	Frascos de sistema	Kimax	2.0 L; diametro de entrada: 3.5 cm diametro: 12.5 cm
D	Flujómetros	Gastek	0 a 15 LPM
E	Resistencia electrica	Volteck	0.75 kw y 0.40 kw
F	Deposito de agua	Sterilite	87.95 x 47.63 x 17.78 cm (57L)
G	Suministro de aire	Kaeser	Compresor de aire
H	Mangueras	Watts	0.64 cm (¼ in) 1.27 cm (½ in) 0.48 cm (3/16 in)
I	Manifold	Repuestos el jaguar	5 salidas de 0.64 cm (¼ in) 10 x 16 x 2 cm
J	Difusor de aire	Virtual Aquarium	2.5 cm
K	Controlador de temperatura	W3230	Rango de 0 a 100 ± 2 °C
L	Medidor de pH y humedad	DIY Electrónica	Rango de lectura húmeda: 0 (Seco)-10 (mojado) Rango de lectura del PH: 8(alcalino) -3.5(ácido)

Figura 13
Vista de perfil del sistema de biodegradabilidad puesto en marcha en el laboratorio de operaciones unitarias.

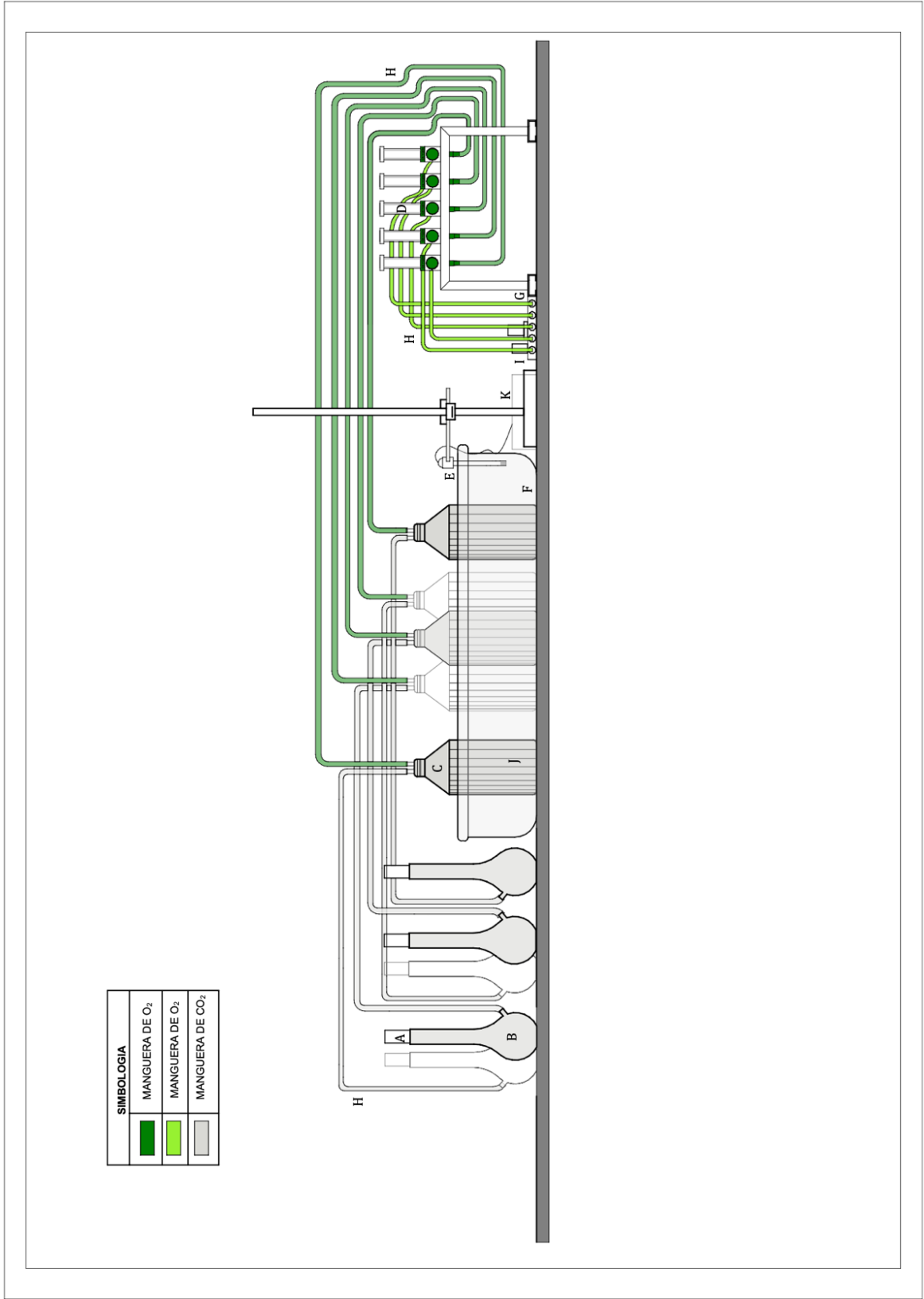
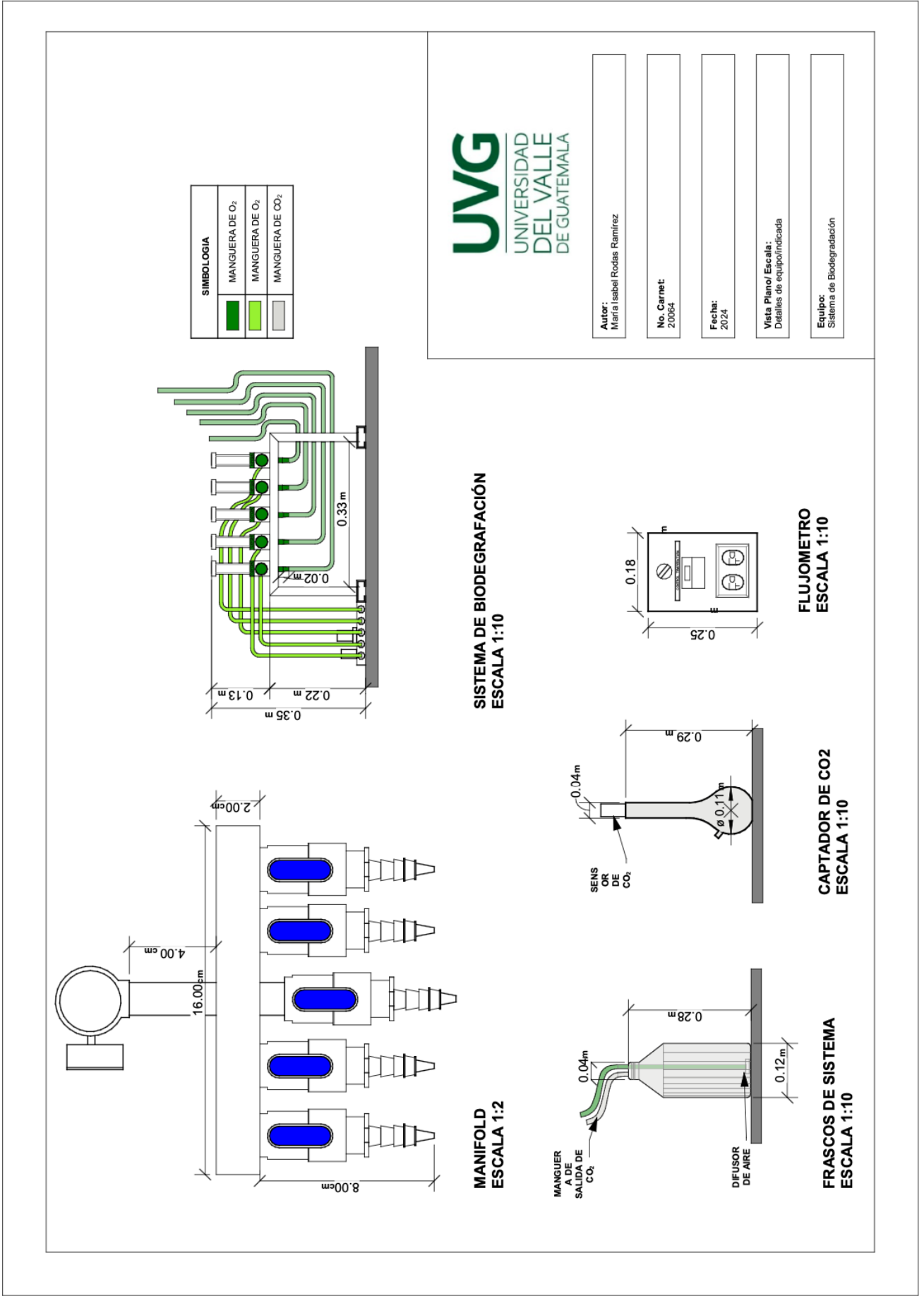


Figura 14

Planos de partes del sistema de biodegradabilidad puesto en marcha en el laboratorio de operaciones unitarias.



B. Método de biodegradabilidad

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE
GUATEMALA**

Facultad de Ingeniería Departamento de
Ingeniería Química

**Método para determinar la biodegradación aeróbica de
materiales plásticos bajo condiciones controladas de
compostaje en laboratorio de operaciones unitarias de
la Universidad del Valle de Guatemala**

Desarrollado por María Isabel Rodas Ramírez

Guatemala, 2024

Definición de variables

- Inóculo = compost
- Control positivo = celulosa (papel periódico) y PHA (plástico biodegradable)
- Control negativo = plástico no biodegradable

Alcance

- Se busca realizar un sistema a escala laboratorio en un ambiente en donde se controla la temperatura, aeración y humedad.
- Método diseñado para convertir una cantidad producida de dióxido de carbono liberado a masa producida de la muestra a analizar
- Tener un equipo sistematizado que determine la biodegradación de materiales plásticos

Documento de referencia

- ASTM D5338 Determinación de la Biodegradación Aeróbica de Materiales Plásticos bajo Condiciones Controladas de Compostaje.

Resumen del método

- El método tiene una duración de 45 días
- Selección de material plástico biodegradable para la determinación de la biodegradación aeróbica en un sistema controlado de compostaje
- Obtener un inóculo de compostaje de residuos sólidos que cumpla con las especificaciones
- Exponer los materiales de prueba a un proceso de compostaje aeróbico controlado junto con el inóculo
- Medir como el dióxido de carbono producido a lo largo del tiempo para determinar el grado de biodegradabilidad
- El porcentaje de biodegradabilidad se obtiene por medio del peso inicial de la muestra y el peso final. Además, se compara con lo obtenido en masa por los sensores medidores de dióxido de carbono.

Significado y uso

- La biodegradación de un plástico dentro de una unidad de compostaje es un fenómeno importante porque afecta la descomposición de otros materiales encerrados por el plástico, la calidad y apariencia resultantes del material compostado.

- La biodegradación de los plásticos busca la eliminación segura de estos plásticos a través de plantas de compostaje de residuos sólidos.
- Este procedimiento se ha desarrollado para permitir la determinación de la tasa y el grado de biodegradabilidad aeróbica de los productos de plástico cuando se colocan en un proceso de compostaje controlado y si son aptos para caracterizarse como tal.
- **Limitaciones:** Debido a que hay una gran variación en la construcción y operación de los sistemas de compostaje y debido a que los requisitos reglamentarios para los sistemas de compostaje varían, este procedimiento no tiene la intención de simular el entorno de ningún sistema de compostaje en particular. Sin embargo, se espera que se parezca al entorno de un proceso de compostaje operado en condiciones óptimas.
- El procedimiento está destinado a crear un entorno de laboratorio estándar que permita una determinación rápida y reproducible de la biodegradabilidad aeróbica en condiciones de compostaje controladas.

Aparatos

- **Sistema de compostaje**
 1. Cinco recipientes de compostaje (dos de sustancia de prueba, uno de blanco, uno de positivo y un control negativo) de dos litros.
 2. Caja plástica para generar un baño térmico.
 3. Sistema de aire presurizado con 5 flujómetros que proporcionen aire a cada uno de los recipientes de compostaje a tasas de aireación precisas.
 4. Cinco frascos captadores de CO₂.
 5. Una resistencia eléctrica que suministre el calor necesario para el baño térmico.
- **Sistema de monitoreo**
 1. Control de temperatura capaces de mantener la temperatura de los recipientes de compostaje a 58 °C o menos.
 2. Cinco sensores Pasco inalámbricos medidores de CO₂.
 3. Software SPARKvue para registrar los datos obtenidos de producción de dióxido de carbono.

Materiales de prueba

- 10 gramos de PHA y papel periódico que se van a utilizar como control positivo.
- 10 gramos de bolsa nombrada como biocompostable que será el material de prueba.

Peligros

- El inóculo de compost puede contener objetos afilados por lo que se debe tener cuidado al manipularlo.
- Los recipientes de compostaje no están diseñados para soportar altas presiones. El sistema debe funcionar cerca de la presión ambiente.
- El sistema trabaja a altas temperaturas y el agua del baño térmico se debe de mantener a un nivel adecuado para evitar que este se queme y afecte el resto de los equipos. No debe de quedarse sin agua en ningún momento.
- El baño térmico trabaja con una resistencia por lo que no se debe de tocar el agua con los dedos ya que se puede quemar y sufrir un choque eléctrico.

Inóculo de compost

El inóculo debe de tener de 2 a 4 meses de antigüedad y debe de contener con las siguientes propiedades:

- pH: 7.0 (neutro)
- Material no volátil: 60.47 ± 0.97
- Carbón orgánico: 8.67%
- Tamaño partículas: mayor a 2 mm
- Producir entre 50 y 150 mg de CO₂ por gramo de sólidos volátiles
- Total, de solidos secos: entre 50 a 55%

Condiciones de las muestras

- Las muestras deben de tener suficiente carbono para producir dióxido de carbono que pueda medirse adecuadamente con el sensor de CO₂.
- Las muestras de prueba pueden estar en forma de películas, granos, o polvo, pero todas deben de estar igual que el control positivo.

Procedimiento

- Preparación de inóculo

1. Recibir el compost y asegurarse que tenga al menos 4 meses de antigüedad y medirle los siguientes parámetros.
2. Con el medidor de pH y temperatura medir que el pH este neutro (7) y que la humedad este en 50% (5).
3. Luego colocar compost en el tamiz para asegurarse que tenga un tamaño de partícula mayor a 2 mm.

- Preparación de muestras

1. Las muestras deben de ser del mismo tamaño y forma por lo que se realiza lo siguiente.
2. Se corta el papel en un tamaño de 5 x 16.5 cm para que sirva de muestra para los otros materiales y se pesan pedazos del mismo tamaño hasta llegar a los 10 gramos.
3. Al tener el papel pesado se humedece para que sea más fácil colocarlo dentro del sistema.
4. Luego se pesan 10 gramos de muestra de PHA y se coloca en un molde del mismo ancho que el papel.
5. Se lleva al esto para convertirlo en una plancha.
6. Encender el horno hasta que se derrita y obtener una lámina uniforme.
7. Al salir esta lamina verificar que el peso sea el deseado.
8. Por último, calentar muestra de bolsa biodegradable hasta que esta reduzca su tamaño y dejarla en forma de lámina al igual que el PHA y el papel.
9. Cortarla hasta lograr pesar 10 gramos de esta.
10. Dividir en 3 la plancha de muestra para ser colocada dentro del sistema.

- Análisis de muestras

1. Con el equipo, el compost y las muestras listas, llenar los frascos con el compost y muestra.
2. Primero poner una base de 300 gramos y luego colocar el primer pedazo de papel.
3. Luego colocar 100 gramos de compost y colocar el segundo pedazo de papel.
4. Por último, colocar 100 gramos más de compost, el tercer pedazo de papel y 100 gramos más de compost. Buscando que las muestras queden bien distribuidas en el frasco y compost.
5. Repetir los pasos del 2 al 4 para los siguientes materiales.
6. Preparar un frasco únicamente con inóculo de compost sin muestra, pero con la misma cantidad total, es decir si se tienen 10 gramos de muestra, este frasco tendrá 610 gramos de inóculo de compost. Este frasco sirve como blanco.
7. Llenar la caja de agua y colocar los frascos dentro de esta, tratando de que el nivel de agua sea lo más alto posible.
8. Rotular los sensores de CO₂ y encenderlos para conectarlos con el software SPARKvue, por medio de bluetooth.
9. Colocar los sensores de CO₂ en la salida de los frascos respectivos, que estarán tomando datos cada minuto, es importante que estos estén cargándose durante toda la prueba para

lograr almacenar los datos.

10. Colocar la resistencia en el soporte y colocarla dentro de la caja con agua, asegurarse de que esta no este pegada a la caja para que no se derrita.
11. Dejar el primer día a 35°C el sistema, luego durante los próximos cuatro días subir la temperatura a 58°C.
12. Comprobar las concentraciones de CO₂ en el aire de salida al menos diariamente durante la primera semana y luego en un intervalo mínimo de 6 horas.
13. Comprobar el flujo de aire diariamente antes de los recipientes de compostaje y en las salidas, asegurándose de que no haya fugas en el sistema completo.
14. Luego de los cuatro días reducir la temperatura a 50°C y dejarlo así hasta el día 28.
15. Después de este tiempo bajar la temperatura a 35°C hasta el final de la prueba que es hasta los 45 días.
16. Agitar los recipientes al menos una vez por semana.
17. Si se realizan ajustes, entonces las concentraciones de CO₂ deben controlarse de cerca durante las siguientes 72 horas y medirse al menos dos veces al día con un intervalo de tiempo de más de 6 horas.

- **Configuración de sensores captadores de CO₂ para guardar datos**

1. Se coloca en una computadora el software Sparkvue, también se puede abrir desde al navegador.
2. Encender uno de los sensores, identificando bien a que muestra corresponderá.
3. Al tener el sensor encendido y el software abierto, seleccionar “Remote logging” y ahí aparece “Sensors available for logging” se selecciona correctamente el sensor que uno quiere según el número de identificación.
4. Al seleccionar el sensor aparece un menú en donde se selecciona la configuración que este va a tener durante la prueba (ver figura).
5. Escoger que se lean datos cada minuto.
6. Al terminar de configurar el sensor cerrar la pestaña y el sensor se coloca dentro del captador de CO₂, asegurarse que el sensor tenga la luz amarilla encendida que es significa que está guardando datos.
7. Esto se repite con cada una de las muestras, y asegurarse de identificar bien los sensores según la muestra que se está analizando con cada uno para descargar bien los datos.
8. Los sensores deben de estar conectados todo el tiempo para guardar los datos.

- **Finalización de prueba**

1. Al haber pasado 45 días se apaga el aire, se desconecta la resistencia y las mangueras de los frascos.
2. Se apagan los sensores y se proceden a descargar los datos.
3. Se procede a vaciar los frascos y ver el material que queda dentro de cada frasco.
4. Separar el compost del material y proceder a pesar los materiales para determinar su peso final, es importante que, para esto los materiales estén completamente secos, como se colocaron inicialmente.
5. Tirar el compost y anotar el peso final de las muestras.

6. Con los datos descargados y el peso final se procede a realizar los análisis de datos para ver la degradación de los materiales.

- **Configuración de sensores captadores de CO₂ para descargar datos**

1. Luego que se termina el experimento, se enciende nuevamente el software y se procede a seleccionar la opción de “Sensors available for logging” en donde se selecciona la opción de descargar datos del sensor según el número de identificación.
2. Se abre una gráfica con los datos, en esta se puede cambiar el nombre y como se quieren presentar los datos. Se escogen las opciones que uno quiere.
3. Al tener esto se selecciona en el menú la opción de exportar datos y se crea un archivo “csv” que ya se puede abrir en Excel.
4. También se selecciona la opción de guardar que guarda el archivo en “spklab” para volver abrirlo en el software.
5. Esto se realiza con cada uno de los sensores y es importante que estén bien identificados cada sensor para no confundir los datos y los archivos.
6. Con los datos ya guardados se procede a analizar los datos.

Cálculos

Por medio de los datos brindados por el sensor

- **Cálculo 1.** Concentración real de CO₂ en base al CO₂ del blanco de la muestra

Para determinar la masa producida de CO₂ se utiliza la concentración que presenta la muestra y el blanco. Se usa como ejemplo la muestra de papel el dato del 09 de mayo de 2024 a la 1:45:50

$$C_{CO_2r} = C_{CO_2m} - C_{CO_2b}$$

Donde:

C_{CO_2r} = Concentración de dióxido de carbono real

C_{CO_2m} = Concentración de dióxido de carbono de la muestra

C_{CO_2b} = Concentración de dióxido de carbono del blanco

- **Cálculo 2.** Liberación de CO₂ de la muestra

Para saber la liberación de CO₂ que tiene la muestra se utiliza el flujo empleado durante la prueba y la concentración de real de dióxido de carbono

$$L_{CO_2} = C_{CO_2r} \times F_p$$

Donde:

L_{CO_2} = Liberación de dióxido de carbono

C_{CO_2r} = Concentración de dióxido de carbono real

F_p = Flujo de alimentación durante la prueba

- **Cálculo 3.** Masa de CO₂ producida de la muestra

Con el tiempo que tenía para la obtención de muestras que se establece en el software se obtiene la más producida

$$m_{CO_2} = L_{CO_2} \times \Delta t$$

Donde:

m_{CO_2} = masa de dióxido de carbono producida

L_{CO_2} = Liberación de dióxido de carbono

Δt = cambio de tiempo de toma de muestras

Por medio de los datos del peso de las muestras

- **Cálculo 4.** Porcentaje de biodegradabilidad de la muestra

Con el peso inicial de las muestras y el peso final que estas presentan, se encuentra por medio de la diferencia la masa producida y el porcentaje de biodegradabilidad. Tomando como ejemplo la muestra de papel

$$P_B = (M_0 - M_f) \times 100$$

Donde:

P_B = Porcentaje de biodegradabilidad

M_0 = Masa inicial de la muestra

M_f = Masa final de la muestra

Interpretación de resultados

- La información sobre la toxicidad del material plástico puede ser útil en la interpretación de los efectos inhibidores.
- En la mayoría de los casos, al investigar un material plástico, es necesario utilizar una sustancia de referencia o control que se sepa que biodegrada, con el fin de verificar la actividad del inóculo.
- Si no se observa una biodegradación suficiente (un mínimo del 70 % para la celulosa en un plazo de 45 días) con la referencia positiva, la prueba debe considerarse inválida y debe repetirse utilizando un nuevo inóculo.
- Se recomienda realizar el experimento en triplicado para cada uno de los materiales evaluados.

Reporte de resultados

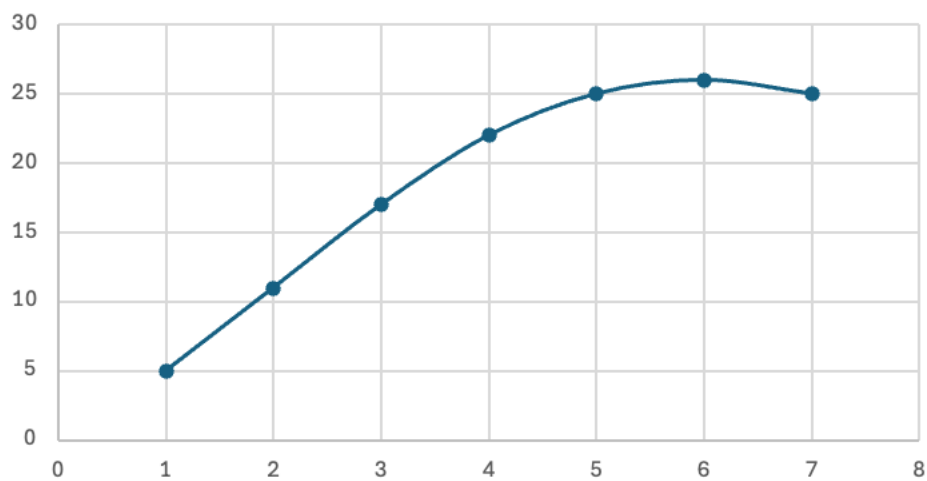
Cuadro 1

Producción de CO₂ de una muestra a lo largo de la prueba

	Biodegradabilidad luego de los 45 días (%)	Desviación estándar	Intervalo de confianza
Corrida 1			
Corrida 2			
Corrida 3			

Figura 1

Producción de CO₂ de la muestra a lo largo de la prueba



Nota 1. Esta gráfica se hace con fines ilustrativos de cómo se pueden presentar los datos, no pretende mostrar ninguna tendencia

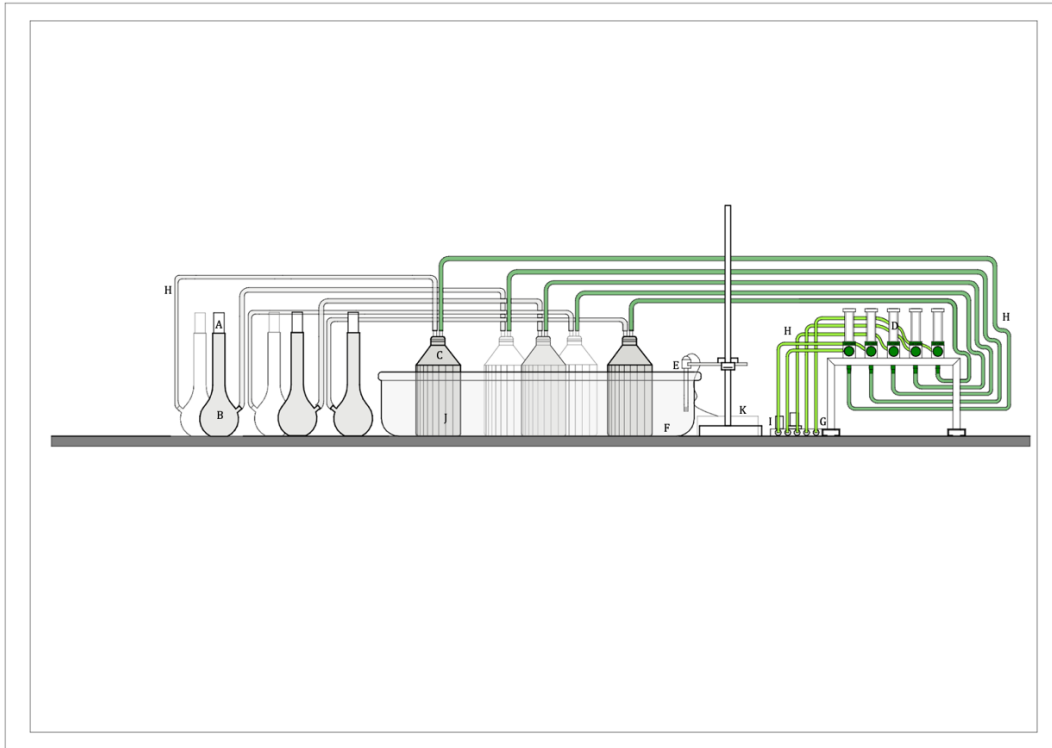
Palabras claves

- Degradación aeróbica
- Biodegradación
- Compostaje
- Plástico biodegradable
- Celulosa
- Plásticos
- Concentración de dióxido de carbono

Sistema de biodegradabilidad

Figura 2

Vista frontal del sistema de biodegradabilidad



Cuadro 1

Partes del sistema

Identificador	Nombre del equipo
A	Sensores de CO ₂
B	Frascos captadores de CO ₂
C	Frascos de sistema
D	Flujómetros
E	Resistencia eléctrica
F	Deposito de agua
G	Suministro de aire
H	Mangueras
I	Manifold
J	Difusor de aire
K	Controlador de temperatura
L	Medidor de pH y humedad

C. Biodegradabilidad de materiales

Se colocaron tres materiales dentro de cada uno de los frascos de sistema , esto para verificar el funcionamiento del equipo y del mismo modo la capacidad de degradación de los distintos materiales durante 45 días en condiciones controladas.

Cuadro 6

Producción de CO₂ del PHA a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	17	6	100	1	100	0.1
16	27	6	160	1	160	0.16
32	83	6	500	1	500	0.5
45	117	6	700	1	700	0.7
TOTAL						1.46

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de dióxido de carbono necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Se presentan los datos de las muestras de papel y bolsa biodegradable que se realizaron en triplicado para aumentar la confiabilidad de los datos obtenidos y poder realizar la prueba de hipótesis

Cuadro 7Producción de CO₂ del papel muestra No.1 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	217	6	1300	1	1300	1.3
16	543	6	3260	1	3260	3.26
32	388	6	2330	1	2360	2.33
45	228	6	1370	1	1370	1.37
TOTAL						8.26

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 8Producción de CO₂ del papel muestra No.2 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	163	6	980	1	980	0.98
16	555	6	3330	1	3330	3.33
32	457	6	2740	1	2740	2.74
45	260	6	1560	1	1560	1.56
TOTAL						8.61

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 9Producción de CO₂ del papel muestra No.3 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	158	6	950	1	950	0.95
16	535	6	3210	1	3210	3.21
32	433	6	2600	1	2600	2.6
45	233	6	1400	1	1400	1.4
TOTAL						8.16

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 10Producción de CO₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.1 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	0	6	0	1	0	0
16	0	6	0	1	0	0
32	-250	6	-1500	1	-1500	-1.5
45	-372	6	-2230	1	-2230	-2.23
TOTAL						-3.73

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 11

Producción de CO₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.2 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO ₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO ₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO ₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO ₂ (g) ± 0.04
3	0	6	0	1	0	0
16	0	6	0	1	0	0
32	-180	6	-1080	1	-1080	-1.08
45	-250	6	-1500	1	-1500	-1.50
TOTAL						-2.58

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 12

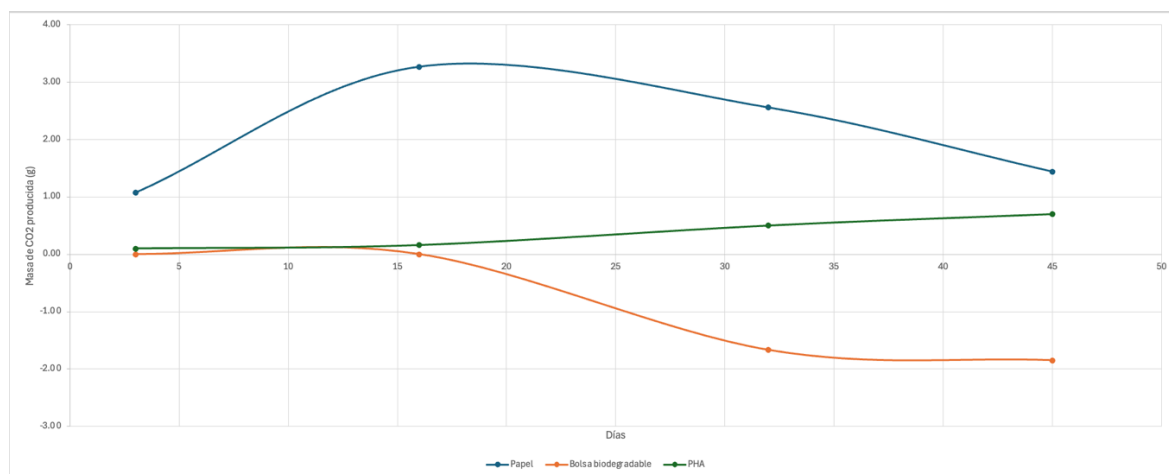
Producción de CO₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.3 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO ₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO ₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.05	Masa producida de CO ₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO ₂ (g) ± 0.04
3	0	6	0	1	0	0
16	0	6	0	1	0	0
32	-365	6	-2190	1	-2190	-2.19
45	-269	6	-1614	1	-1614	-1.61
TOTAL						-3.80

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Figura 15

Producción de dióxido de carbono de las muestras a lo largo de la prueba



Nota. La gráfica presenta los puntos experimentales de las pruebas resumidas en las 4 fases de la degradación, las líneas representan una tendencia suavizada generada con Microsoft Excel. Los datos se obtuvieron con el sensor medidor de dióxido de carbono marca PASCO. Para el papel y la bolsa biodegradable, los datos de la gráfica para los datos de papel periódico y bolsa biodegradable son los valores promedio de las 3 muestras que se realizaron.

Cuadro 13

Resultados de biodegradación de materiales en sistema de compostaje

Material	Masa muestra inicial (g) ± 0.01	Masa muestra final (g) ± 0.01	Masa perdida en la muestra (g) ± 0.01	Porcentaje de biodegradabilidad (% m/m) ± 0.01
Papel periódico	10	1.66	8.34	83.4
PHA	10	8.54	1.46	14.6
Bolsa Biodegradable	10	10	0	0.0

Nota. Los calculos necesarios para saber la biodegradación de las muestras se encuentran en anexos sección E cálculo 12 del apéndice. La masa de las muestras tanto inicial como final se obtiene a partir de una balanza. Para el papel y la bolsa biodegradable, los datos de la tabla son los valores promedio de las 3 muestras que se realizaron.

D. Determinación de biodegradabilidad de una bolsa etiquetada como tal

Se da el planteamiento de hipótesis nula y alternativa para prueba t de student. Se sabe que el valor aceptado para que un plástico pueda ser etiquetado como biodegradable bajo la norma ASTM D5338 es que este pierda 60% o mas del peso original de la muestra inicial. Se plantea la siguiente pregunta, ¿la muestra presenta una pérdida menor al 60%?

Cuadro 14

Parámetros para prueba de hipótesis

Hipótesis	$H_0 = \mu \geq 60$ $H_a = \mu < 60$
Criterios de decisión	t calculada > -6.69 aceptar H_0 t calculada \leq -6.69 rechazar H_0

Nota. Para ambas muestras se usan estos datos y se tienen 3 datos con 2 grados de libertad. Se utiliza una significancia de 0.01. Para la t crítica se utiliza la tabla No.1 del apéndice sección H.

Cuadro 15

Datos de prueba estadística para las distintas pruebas

	Papel periódico	Bolsa biodegradable
Media	83.43	-35.19
Desviación estándar	0.24	0.69
T calculada	0.97	-9.18
Criterio de decisión	t calculada > -6.69 aceptar H_0	t calculada \leq -6.69 rechazar H_0
Decisión	Es biodegradable	No es biodegradable

Nota. Estos datos se obtienen de los análisis de error del 1 al 8 de la sección G del apéndice se hacen por medio de Microsoft Excel. Los datos de la tabla son los valores promedio de biodegradabilidad de las 3 muestras que se realizaron para cada tipo con los datos obtenidos por el sensor medidor de dióxido de carbono marca PASCO.

VIII. Discusión de resultados

Para esquematizar el equipo necesario para realizar las pruebas de biodegradabilidad, fue esencial conocer las especificaciones y condiciones requeridas para su desarrollo. El sistema contaba con una fuente principal de aireación suministrada por un compresor marca Kaeser. Para alimentar el sistema de aire a través de la tubería, se utilizó un regulador de presión que debía estar conectado tanto a la tubería como a un manifold con 5 puertos de salida, destinado a suministrar aire a los frascos del sistema. El tamaño del conector de la manguera era de 0.635 cm (1/4 in) (ver Figura 38). Este tamaño se determinó en función de la entrada de los flujómetros, ya que el manifold debía estar conectado a estos dispositivos, los cuales tenían tanto entrada como salida del mismo tamaño (0.635 cm, 1/4 in). Según el cálculo 3 del apéndice, sección E, y considerando la necesidad de mantener un flujo que asegure un exceso de oxígeno del 6% (según ASTM D5338-98), se estableció que los flujómetros debían proporcionar un flujo de 8.5 litros por minuto.

Se requería un sistema compuesto por 5 flujómetros (ver Figura 32), que permitieran medir la cantidad de fluido que circulaba a través del sistema en un tiempo determinado (Catedras,2018), garantizando así las condiciones adecuadas dentro del proceso. Cada uno de los flujómetros estaba conectado a los frascos de sistema a través de una manguera, la cual se ajustaba a los conectores de los frascos, que contaban con un conector doble: uno para la entrada de aire y otro para la salida. Esto permitía la conexión simultánea del frasco con los flujómetros y con el sistema de aireación a través de un difusor. El difusor de aire fue colocado dentro de cada frasco para asegurar una distribución uniforme del aire hasta el fondo de este, evitando interferencias en las lecturas del sensor de dióxido de carbono, asegurando que lo que se estaba midiendo fuera el generado por el sistema de biodegradación y no por el proceso de aireación. El difusor debía tener un diámetro máximo de 3.0 cm, ya que la entrada del frasco era de 3.5 cm. Además, cada frasco contaba con un conector de manguera adicional para la salida del aire, el cual se utilizaba para conectar el frasco al sistema de captura de dióxido de carbono, con un tamaño de 1.27 cm (1/2 in). El frasco del sistema debía tener una capacidad de dos litros, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM D5338. Para una vista completa del frasco de sistema, consultar la Figura 31.

Se utilizaron frascos captadores de dióxido de carbono fabricados mediante impresión 3D, con una altura de 27.0 cm, lo que permite un adecuado desarrollo del gas. Este diseño cumple con la regla de que la altura sea ocho veces el diámetro del sensor. Los frascos tienen forma de balón aforado (ver Figura 29) y cuentan con una entrada de 1.27 cm para asegurar una conexión adecuada con la manguera y permitir su correcta impresión en la impresora 3D. Además, el diámetro del frasco es de 11.0 cm, lo que facilita su ajuste en

la impresora y garantiza la forma deseada. En la boquilla del frasco captador se colocaron sensores especializados para medir el dióxido de carbono, razón por la cual el diámetro de la boquilla es de 3.5 cm. Los sensores deben ser capaces de medir concentraciones de entre 0 y 10,000 miligramos por litro, para detectar con precisión el dióxido de carbono generado por la degradación de los materiales (Naba Kumar, 2021). Adicionalmente, se utilizó un baño térmico para suministrar la temperatura necesaria a los frascos del sistema. El baño térmico fue construido a partir de una caja plástica, cuyas dimensiones mínimas, determinadas mediante el cálculo cuatro del apéndice, sección E, fueron de 25.0 x 65.0 x 27.0 cm. Esto permite acomodar los cinco frascos y manipularlos correctamente. El baño térmico operaba con agua y resistencias; se emplearon dos resistencias, una de 0.75 kW para alcanzar temperaturas de entre 50 y 58°C, y otra de 0.40 kW para llegar a 35°C. Una parte esencial del baño térmico fue contar con un controlador de temperatura capaz de regular entre 30 y 65°C, asegurando así las condiciones óptimas del sistema. Finalmente, se incluyó un medidor de pH y un medidor de humedad para garantizar un pH neutro de 7 y una humedad del 50%, respectivamente. Además, se utilizó un tamiz con malla 10, ya que el compost debe tener un tamaño de partícula mayor a este valor, de acuerdo con la norma ASTM D5338-89.

Con las especificaciones mencionadas anteriormente, se esquematizó el equipo mostrado en la Figura 13, que presenta una vista de perfil del sistema de biodegradabilidad implementado en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, siguiendo los estándares de la norma ASTM. El cumplimiento de estos estándares fue crucial para garantizar la validez y precisión del experimento. En el esquema se incluyen los sensores de dióxido de carbono marca PASCO, con un rango de 0 a 100,000 mg/L y una capacidad de almacenamiento de más de 55,000 puntos de datos (PASCO, 2024). También se muestran los frascos captadores de dióxido de carbono, fabricados en la Universidad del Valle, con 29.0 cm de alto y 11.0 cm de diámetro. Los frascos del sistema son marca Kimax, con una capacidad de dos litros, un diámetro de entrada de 3.5 cm y un diámetro total de 12.5 cm.

Los flujómetros utilizados son de la marca Gastek, con un rango de 0 a 15 litros por minuto. Como depósito de agua para el baño térmico, se emplea una caja marca Sterilite, con capacidad de 57 litros y dimensiones de 87.95 x 47.63 x 17.78 cm. Se utilizan dos resistencias marca Volteck, de 0.75 kW y 0.40 kW, junto con un controlador de temperatura marca W3230, con un rango de 0 a 100 ± 2 °C. El suministro de aire es proporcionado por un compresor marca Kaeser, y las distintas partes del sistema están conectadas con mangueras marca Watts de 0.64 cm, 1.27 cm y 0.48 cm de diámetro. El sistema cuenta con un manifold marca Repuestos El Jaguar con 5 salidas de manguera de 0.64 cm y dimensiones de 12 x 16 x 2 cm. Para la distribución del aire, se utiliza un difusor marca Virtual Aquarium de 2.5 cm de ancho. Finalmente, se incluyó un medidor de pH y humedad marca DIY Electrónica, con un rango de lectura de humedad de 0 (seco)

a 10 (mojado), y un rango de lectura de pH de 8 (alcalino) a 3.5 (ácido).

Los puntos críticos del sistema incluían el control del flujo de aire, la humedad, el mantenimiento de la temperatura y la captura de dióxido de carbono, todos ellos fundamentales para crear un entorno de compostaje controlado. Estos parámetros se revisaban de manera constante y se ajustaban según las necesidades del sistema. Un ejemplo de esto es el flujo de aire que inicialmente, a través de cálculos, se determinó un flujo de 8.5 litros por minuto. Sin embargo, al comenzar el experimento, se concluyó que el flujo óptimo, que aún garantizaba tasas de oxígeno lo suficientemente altas para mantener los niveles por encima del 6% en el aire de escape (ASTM D5338-98) y no afectaba la humedad del sistema, era de 6.0 litros por minuto. La humedad se mantuvo en 5, según la lectura del medidor de humedad y pH, lo que indicaba un nivel de 50%, y el pH se registró en 7, lo que muestra un entorno neutro, el nivel requerido para el compostaje.

Tanto la aireación como la humedad del sistema están relacionadas. La aireación constante está directamente vinculada con la producción de dióxido de carbono, como se observa en el cálculo diez de la sección E del apéndice, asegurando así que el sistema se mantenga aeróbico, lo cual es crucial para la descomposición de los materiales y la producción continua de dióxido de carbono (ASTM 5338-98). Si no se mantiene un flujo adecuado de aire, no se produce una cantidad significativa de dióxido de carbono. El control de la temperatura fue un aspecto esencial, garantizado mediante un baño térmico que proporcionó las temperaturas necesarias para reproducir las fases mesófilas, termófila y de curado del compostaje, cada una de las cuales influye en la degradación de los materiales. La fase termófila es la más importante para la degradación, ya que durante esta predominan los microorganismos termófilos, capaces de descomponer materiales más complejos (Román, 2013).

Además, se desarrolló e implementó una metodología basada en la norma ASTM D55338 la cuál es un método para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos bajo condiciones controladas de compostaje en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, con el objetivo de garantizar que el proceso de evaluación de biodegradabilidad de materiales pueda ser replicado y puesto en marcha adecuadamente en futuros estudios. El método tiene una duración de 45 días y se detallaron cuidadosamente los pasos del proceso experimental, incluyendo control de variables claves como la temperatura, humedad, inóculo y flujo de aire lo cual es fundamental para asegurar la consistencia y replicabilidad de los resultados a escala laboratorio. Se establecieron procedimientos estandarizados como la incorporación de un control positivo, papel periódico, que verifica el desarrollo de la metodología, ya que los materiales celulósicos deben de producir al menos un 70% en peso en CO₂ del, pero original del material (ASTM D5338-98). El porcentaje de biodegradabilidad se obtiene

por medio del peso inicial de la muestra y el peso final que se compara con lo obtenido en masa por los sensores medidores de dióxido de carbono.

Se detallaron las condiciones del inoculo que debe de tener al menos de dos a cuatro meses de antigüedad, pH neutro con un tamaño de partícula mayor a dos milímetros (ASTM D5338-89). Como parte del procedimiento se tuvo la preparación del inoculo cumpliendo estos parámetros. Luego se tiene la preparación de las muestras las cuales deben de tener un mismo peso, tamaño y forma que el control positivo, que era el papel, ya que el tamaño influye en la superficie expuesta al contacto con los microorganismos y el oxígeno. Con esto se pueden tener tasas de biodegradación similar lo que ayuda a la consistencia y comparabilidad de resultados (Leja, K., & Lewandowicz, 2010). Luego se detalla el análisis de muestras en donde se tenía la configuración de cinco frascos de sistema con la misma cantidad de inoculo y de muestra. Era importante contar con un frasco que fuera el blanco del sistema, el cual solo contaba con con inoculo, pero con el mismo peso que los frascos que tenían muestra e inoculo ya que permite distinguir entre los efectos causados por este y los efectos causados por la muestra de material en sí mismo. Esto sirve luego para corregir los resultados experimentales de los frascos con la muestra e inóculo.

También se tenía la configuración de sensores medidores de dióxido de carbono marca PASCO, para guardar y descargar los datos de la experimentación, los cuales se conectaron al software Sparkvue, donde se pueden analizar los datos y exportar en un archivo para procesarse en Microsoft Excel. Por último, se tiene el proceso de finalización de prueba en donde se ve el peso final de las muestras analizadas para determinar el porcentaje de biodegradabilidad de las distintas muestras.

A partir de la implementación del equipo y el método, se logró medir la biodegradabilidad de tres materiales, papel periódico, polihidroxicanoato (PHA) y una bolsa biodegradable etiquetada como compostable. Los dos primeros materiales sirvieron para verificar el método desarrollado utilizando un estándar polimérico certificado como biodegradable. En el caso del papel periódico, tras 45 días de prueba y considerando un período de tres días para que el sistema se estabilizara, se determinó que la masa de dióxido de carbono producida fue de 8.26 gramos, para la primera muestra de 8.61 gramos para la segunda muestra y para la tercera muestra de 8.16 gramos a partir de los cálculos del 9 al 11 de la sección E del apéndice. Este dato se comparó con la pérdida de peso de la muestra. Al inicio de la prueba, el peso inicial de las muestras era de 10 gramos, y al finalizar, las muestras pesaban 1.74 gramos, 1.39 y 1.84 gramos, lo que indica una pérdida de 8.26 gramos, 8.61 gramos y 8.16 gramos respectivamente. Este valor se correlaciona con la producción de CO₂ registrada por el sensor, lo que indica que el papel periódico efectivamente se biodegrada en condiciones de compostaje debido a la acción de microorganismos como bacterias y hongos, que lo utilizan como fuente de carbono.

Las cadenas de polímeros se pueden degradar por la rotura de sus enlaces centrales y laterales. La degradación implica una disminución de su peso molecular (Eubeler, 2010). Como valor promedio se tienen 1.66 gramos promedio al final y una masa promedio de dióxido de carbono promedio producido a partir de los sensores 8.34 gramos

La temperatura controlada permite simular la fase termofílica, la cual presenta las temperaturas más elevadas, entre 50°C y 58°C, condiciones en las que los microorganismos descomponen la celulosa con gran velocidad. Además, la humedad controlada asegura que estos microorganismos mantengan su actividad metabólica, facilitando la biodegradación. Por medio del cálculo 12 de la sección E del apéndice se determina que el papel periódico tiene una biodegradabilidad del 83.43% de superando lo establecido por la norma de que los materiales celulósicos deben de producir al menos 70% en peso de dióxido de carbono del peso original del material (ASTM D5338-98). Esto se obtiene tanto de los valores indicados por el sensor como de la prueba de cambio de peso que sufren las muestras.

En el caso del PHA este tiene una masa producida luego de la experimentación de 1.46 gramos, a partir de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice. Este dato también se compara con la pérdida de peso de la muestra. Al inicio de la prueba, su peso era de 10 gramos, y al finalizar, pesaba 8.54 gramos lo que indica una pérdida de 1.46 gramos. Valor que se correlaciona con la producción registrada por el sensor. Sin embargo, como se muestra en el cuadro 6 y en la Figura 13, en los últimos días de prueba es donde aumenta la producción de dióxido de carbono por lo que se recomienda estudiar la influencia del tiempo que puede llegar a tener con diferentes tipos de polímeros. Se determinó un porcentaje de biodegradabilidad del 14.6%, a partir del cálculo 12 de la sección E del apéndice, el cual se atribuye a la acción de diversas bacterias y hongos presentes en el ambiente que actúan sobre el PHA. Estos organismos secretan enzimas extracelulares (como lipasas y proteasas), que rompen las cadenas de PHA en fragmentos más pequeños o monómeros de hidroxiácidos. Posteriormente, estos monómeros son utilizados por los microorganismos como fuente de carbono y energía, lo que lleva a la producción de CO₂, agua y biomasa (Devi et al., 2016).

Para determinar la biodegradabilidad de un polímero etiquetado como tal, se utilizó una bolsa rotulada como biodegradable y compostable. Se colocaron tres muestras en distintos frascos dentro del sistema, y de cada una se midió la masa de dióxido de carbono producida a lo largo de la experimentación. Para la primera muestra, se obtuvo una producción de CO₂ de -3.73 gramos, para la segunda -3.02 gramos, y para la tercera -3.80 gramos, de acuerdo con los cálculos del 9 al 11 de la sección E del apéndice. Estos valores se presentaron como negativos debido a la corrección con el blanco, lo que permite aislar la cantidad de dióxido de carbono generada exclusivamente por la muestra, tal como se describe en el cálculo 9 de la sección E del apéndice. Sin embargo, en el caso de la bolsa

biodegradable, los valores obtenidos fueron aún más bajos que los del blanco, lo que sugiere que el compost estaba muriendo. Esto se debe a que la bolsa, al ser un material inerte, dificultaba la aireación y no permitía una distribución uniforme del oxígeno. Además, afectaba tanto la humedad como la temperatura, alterando el equilibrio y la eficiencia del proceso de compostaje (DNest Agency, 2020). Al comparar el peso de la muestra, se observó que al inicio de la prueba pesaba 10 gramos, y al finalizar, su peso seguía siendo de 10 gramos, lo que indica una pérdida de 0 gramos. Este resultado respalda que la bolsa no estaba siendo biodegradada, confirmando que su presencia interfiere con el proceso de compostaje y no contribuye a la descomposición activa. Se determinó un porcentaje de biodegradabilidad de 0% a partir del cálculo 12 de la sección E del apéndice. Esto debido a que no todos los plásticos etiquetados como biodegradables cumplen con los estándares necesarios para degradarse en compost. Además, pueden contener aditivos o componentes que no se descomponen fácilmente, como ciertos biopolímeros o mezclas de polímeros sintéticos y naturales (Sánchez, 2021).

Además, para la bolsa biodegradable y papel periódico se obtuvieron una masa promedio del porcentaje de dióxido de carbono producido de -35.19 y -83.43 gramos, con una desviación estándar de 17.94 y 41.76 respectivamente. Estos datos se utilizaron para realizar una prueba de hipótesis utilizando el parámetro t de Student. Según la norma ASTM D5338, un plástico puede ser etiquetado como biodegradable si pierde 60% o más del peso original de la muestra inicial. A partir de esto, se planteó la siguiente pregunta: ¿La muestra presenta una pérdida menor al 60%? La hipótesis nula establece que el valor promedio es mayor o igual al 60%, mientras que la hipótesis alternativa plantea que es menor al 60%. A través de los cálculos de análisis de error descritos en la sección G del apéndice, se obtuvo un valor de t calculada de -9.19 para el caso de la bolsa biodegradable y de 0.97 para el papel periódico. El valor de t crítica, determinado a partir de los grados de libertad y de la tabla 1 de la sección H del apéndice, fue de -6.69. Los criterios de decisión indican que si t calculada es mayor que -6.69, se acepta la hipótesis nula; si es menor o igual, se rechaza la hipótesis nula. Dado que los datos obtenidos muestran que t calculada es menor que -6.69, para el caso de la bolsa biodegradable se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la muestra no presenta una pérdida mayor al 60%. Por lo tanto, el material no puede ser considerado como biodegradable bajo la norma ASTM D5338, mientras que para el caso del papel periódico la t calculada es mayor que -6.69 por lo que se acepta la hipótesis nula, concluyendo que la muestra presenta una pérdida mayor al 60% y en este caso mayor aún que el 70% que se requiere para materiales celulósicos. De esta manera es considerado como biodegradable bajo la norma ASTM D5338.

Por medio del equipo implementado se ve la importancia de la certificación de los productos biodegradables ya que los resultados muestran que no todos los productos etiquetados como biodegradables cumplen con los estándares para considerarse como tal.

Junto con esto se ve la importancia de que el país implemente regulaciones que incentiven o requieran del uso de materiales biodegradables compostables certificados ya que esto aseguraría que los productos plásticos y envases que entran al mercado puedan ser gestionados adecuadamente en sistemas de compostaje, como lo hace Francia y Alemania, entre otros países, especialmente en el sector alimenticio (Parker, 2022). A pesar del buen desempeño del sistema con las muestras analizadas se recomienda estudiar formas alternas de mantener la humedad dentro de los sistemas experimentales para asegurar el porcentaje de humedad en todo momento.

IX. Conclusiones

- Evaluando la norma ASTM D5338 se determinaron las partes principales para desarrollar la metodología que son: un sistema controlado de aire, medición de dióxido de carbono, sistema de calor y frascos para sistema de compostaje. A partir de esto se seleccionaron los principales equipos los cuales son: sensores medidores de dióxido de carbono marca Pasco, flujómetros marca Gastek, frascos captadores de dióxido de carbono y frasco marca Kimax de dos litros para el sistema.
- Se desarrolló una metodología con base en la norma ASTM D5338 para poder ser utilizada en el sistema implementado, que integra la definición de variables, el alcance, un resumen del método, los equipos utilizados, los peligros que se puedan presentar, la condiciones del inoculo, las condiciones de las muestras, el procedimiento, los cálculos para detminar la producción de dióxido de carbono, la interpretación de resultados, el reporte para los resultados y el esquema del sistema de biodegradabilidad para asegurar el cumplimiento de la norma ASTM D5338.
- La implementación del método ASTM D5338 en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala permitió evaluar la biodegradabilidad de papel periódico que alcanzó un valor de 82.6% (m/m). Por medio de la prueba estadística de t de student dado que los datos obtenidos muestran que t calculada es mayor que -6.69, se acepta la hipótesis nula. La muestra presenta una pérdida mayor al 60, por lo tanto, el material puede ser considerado como biodegradable bajo la norma ASTM D5338.
- La evaluación de una bolsa identificada como biodegradable y obtenida del mercado local, presentó 0% (m/m) de degradación en las condiciones controladas de compostaje establecidas por la metodología desarrollada. Por medio de la prueba estadística de t de student dado que los datos obtenidos muestran que t calculada es menor que -6.69, se rechaza la hipótesis nula. La muestra no presenta una pérdida mayor al 60, por lo tanto, el material no puede ser considerado como biodegradable bajo la norma ASTM D5338.

X. Recomendaciones

- Estudiar formas alternas para mantener la humedad y como se debe de ajustar el flujo de aire para asegurar el porcentaje de humedad en todo momento
- Estudiar la influencia del tiempo en los distintos tipos de polímeros para ajustarlo según los requerimientos y lograr que estos alcancen una degradación completa.
- Como siguiente paso, se recomienda evaluar la posible presencia de micro plásticos o residuos tóxicos después del proceso de biodegradación, con el fin de analizar en profundidad el impacto ambiental del material.
- Monitorear y conocer la composición del compost que se utiliza para asegurar que contenga los microorganismos necesarios para la biodegradación de los materiales a evaluar.
- Realizar un estudio comparativo entre distintos tipos de polímeros etiquetados como compostables y otros biodegradables, utilizando diferentes normas como ASTM D6400 (compostabilidad) y ASTM D5338 (biodegradabilidad). Para definir los límites de ambos términos y a educar tanto a fabricantes como a consumidores.
- Desarrollar un análisis de ciclo de vida (ACV) de los materiales poliméricos biodegradables, considerando su producción, uso, y disposición final en Guatemala. Para evaluar el impacto ambiental global de estos materiales, desde su fabricación hasta su descomposición final, y proporcionar una evaluación completa de su sostenibilidad.
- Investigar cómo diferentes aditivos (por ejemplo, colorantes, plastificantes o estabilizantes) usados en la fabricación de plásticos biodegradables afectan su tasa de biodegradación en sistemas de compostaje.
- Realizar pruebas de presión o vacío antes de iniciar el ensayo para garantizar que no haya pérdidas de gas.
- Desarrollar e implementar una norma que estandarice el tamaño y área superficial de las muestras utilizadas en pruebas de biodegradabilidad, con base en criterios científicos y operativos que aseguren la representatividad y reproducibilidad de los resultados.

- Implementar un sistema de control térmico automatizado que garantice una distribución uniforme de la temperatura en todo el reactor.
- Ampliar el enfoque del sistema de biodegradabilidad de plásticos incorporando estándares ASTM adicionales que complementen la evaluación en diversos entornos.

XI. Referencias bibliográficas

Abdelmoez, W., Dahab, I., Ragab, E. M., Abdelsalam, O. A., & Mustafa, A. (2021). *Bio- and oxo-degradable plastics: Insights on facts and challenges*. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(5), 1981-1996.

Albertsson, A. C., & Varma, I. K. (2002). *Aliphatic polyesters: Synthesis, properties and applications*. *Degradable aliphatic polyesters*, 1-40.

Amigos de la tierra. (2015). *Manual básico para hacer compost*. Amigos de la Tierra. https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2015/03/compost_esp_v04.pdf

Anderson A.J. y Dawes E.A. (1990). *Occurrence, metabolism, metabolic role, and industrial uses of bacterial polyhydroxyalkanoates*. *Microbiol. Rev.* 54,450-472.

Álvarez, D. O. (2021, 30 septiembre). *Polímeros: origen, tipos, usos, ejemplos y características*. Enciclopedia Humanidades. <https://humanidades.com/polimeros/>

Bastioli, C. (1998). *Handbook of biodegradable polymers*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

Belio, P. (2021). *Recomendaciones para tomar medidas de CO2*. Obtenido de Initial: <https://www.initial.com/es/blog/higiene-del-aire/recomendaciones-tomar-medidas-co2#:~>

Biopolymers, P. (2022, 7 junio). *Plástico compostable: ventajas y características*. Primebiopolymers. <https://primebiopol.com/plasticos-compostable-ventajas-y-caracteristicas/>

Brazel, C. S., & Rosen, S. L. (2012). *Fundamental principles of polymeric materials*. John Wiley & Sons.

Bustamante. (2020). *Química de los polímeros*. Obtenido de Emaze: https://www.emaze.com/@aiccrzil/S14-BQV-QUIMICA-II_ACT-03_CONTENTIDO-MACROMOLECULAS-SINTETICAS

Casey J. (1980) *Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology*. 3rd edition Vol. 1 and 2. Part of a classic textbook in the field of pulp and paper technology

Catedras . (2018). *Instrumentación Industrial de Procesos Departamento de Ingeniería de Procesos y gestión Industrial*. Obtenido de Universidad Facet Argentina : <https://catedras.facet.unt.edu.ar/iidpr/wp-content/uploads/sites/86/2020/11/Tema-5.2-Elementos-de-Caudal.pdf>

Clase Estadística. (2020, 30 noviembre). *Prueba de hipótesis* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=k4HQJlrz1jg>

Clayden, J., Greeves, N., & Warren, S. (2013, Julio). *Polimerización*. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/07/polimerizacion.html>

Composting. (2020, 20 Julio). <https://www.nrdc.org/stories/composting-101#community>

Devi, R. S., Kannan, V. R., Natarajan, K., Nivas, D., Kannan, K., Chandru, S., & Antony, A. R. (2016). *The role of microbes in plastic degradation*. Environ. Waste Manage, 341.

DNest Agency. (2020). *¿Qué son los residuos inertes?* Obtenido de AMBAR: <https://ambarplus.com/residuos-inertes-que-son/#:~:text=Los%20residuos%20inertes%20son%20aquellos,es%20el%20caso%20del%20pl%C3%A1stico.>

Ecozema. (2016, 14 noviembre). *Biodegradabilidad y compostabilidad* | Ecozema - español. Ecozema. <https://ecozema.com/es/focus/biodegradabilidad-y-compostabilidad/#:~:text=La%20biodegradabilidad%20es%20la%20capacidad,la%20actividad%20enzim%C3%A1tica%20de%20microorganismos.>

Eubeler, J. P. (2010). *Biodegradation of synthetic polymers in the aquatic environment*. Doctoral dissertation, Universität Bremen.

Florez , L. (2023). *Diferencias entre materiales biodegradables, compostables, biopolímeros, polímeros bio-basados y cómo aportan a la sostenibilidad de la industria de plásticos* . Obtenido de Instituto de capacitación e investigación del plástico y caucho: <https://ccip.intec.edu.do/wp-content/uploads/simple-file-list/Webinar-Diferencias-entre-materiales-biodegradables-compostables-biopolimeros-polimeros-bio-basados-y-c.pdf>

Gardi, C., & Jeffery, S. (2009). *Soil biodiversity*. Brussels: EUR-OP.

Geyer, Roland, Jenna R. Jambeck, y Kara Lavender Law. “*Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made*”. Science Advances 3, nro. 7 (19 de julio de 2017): e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

Green World DMD. (2024). *Certificados de plásticos biodegradables o compostables*. Obtenido de Green World DMD: <https://webtc.eu/certificados-c-64/certificados-p-436?language=es>

Gu, J. D., Ford, T., B, M., & Mitchell, R. (2000). *Microbial degradation of polymeric materials*

Guaita, M., Chiantore, O., & Costa, L. (1985). *Changes in degree of polymerization in the thermal degradation of polystyrene*. Polymer degradation and stability, 12(4), 315-332.

Instituto Nacional de Estadística. (2019). *Instituto Nacional de Estadística Guatemala*. INE. <https://www.ine.gob.gt/>

- Jakubowicz, I. (2003). *Evaluation of degradability of biodegradable polyethylene (PE)*. Polymer degradation and stability, 80(1), 39-43
- Jayasekara, R., Harding, I., Bowater, I., & Lonergan, G. (2005). *Biodegradability of a selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment of biodegradation*. Journal of Polymers and the Environment, 13(3), 231-251
- Jendrossek, D., & Handrick, R. (2002). *Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates*. Annual Review of Microbiology, 56(1), 403-432.
- Knight W (1997) *Compost convective airflow, N and C conservation with passive and active aeration*. M. Sc. Thesis, Agric. And Biosystems Eng. McGill University, Canada
- Leja, K., & Lewandowicz, G. (2010). *Polymer biodegradation and biodegradable polymers-a review*. Polish Journal of Environmental Studies, 19(2).
- Naba Kumar, K. (2021). *Demonstrating an ideal compostable plastic using biodegradability kinetics of poly (lactic acid) (PLA) based green biocomposite films under aerobic composting conditions*. ELSEVIER, 10.
- Nuñez, L., Zambrano, G., & Rossi, C. (2019). *Plásticos biodegradables: terminología y normativa como referencia en el ámbito científico y legislativo*. Revista 38 UVG.
- PNUD. (2020). *El ABC de los plásticos*. <https://www.undp.org/es/el-abc-de-los-plasticos>
- Rabek, J. F. (1994). *Polymer photodegradation: mechanisms and experimental methods*. Springer Science & Business Media.
- Raimond B. Seymour & Charles E. Carraher, *Introducción a la Química de los Polímeros*, Editorial Reverté, Barcelona, 1995.
- R5 living. (2021). Obtenido de R5 living: <https://r5living.com/es/blogs/livingr5/biodegradabile-e-compostabile-quali-sono-le-differenze>
- Roman , P. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Sanchez , J. (2021). *Apuesta por aditivos biodegradables*. Obtenido de Ambiente Plástico: <https://ambienteplastico.com/apuesta-por-aditivos-biodegradables/>
- Sayrmour, R. B. (2021). *Introducción a la química de los polímeros*. Reverté.
- Shen, L., Haufe, J., & Patel, M. K. (2009). *Product overview and market projection of emerging bio-based plastics PRO-BIP 2009*. Report for European polysaccharide network of excellence (EPNOE) and European bioplastics, 243

Sherrington, C., Darrah, C., Hann, S., Cole, G., & Corbin, M. (2016). *Study to support the development of measures to combat a range of marine litter sources*: Report for European Commission DG Environment.

SPI: The Plastics Industry Trade Association. (2016). *Bioplastics simplified: attributes of biobased and biodegradable plastics*. *spi*. Obtenido de <https://bioplastics.org.au/wp-content/uploads/2016/05/Bioplastics-Simplified.pdf>

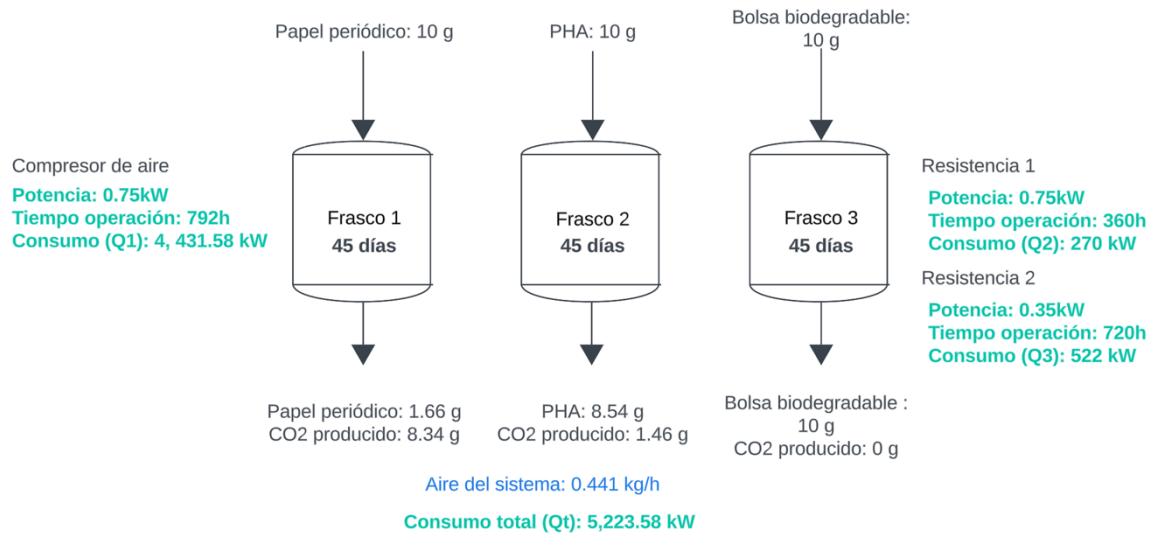
Wade, L., 2017. *Química orgánica*. Volumen 1. 9th ed. Ciudad de México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

XII. Apéndice

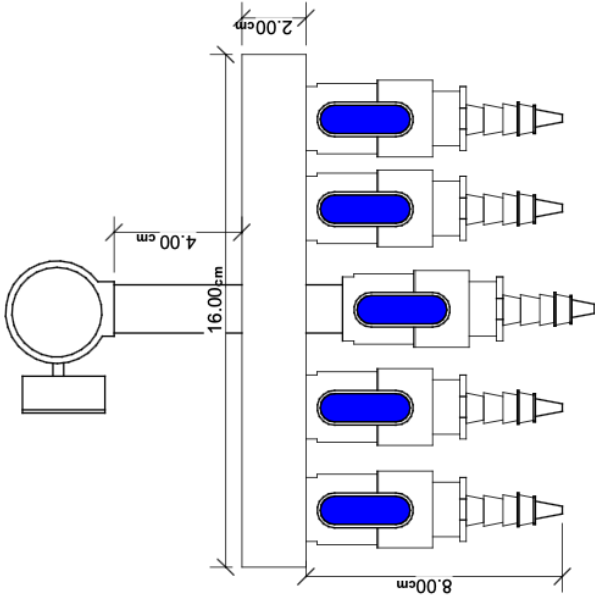
A. Diagrama de flujo

Figura 16

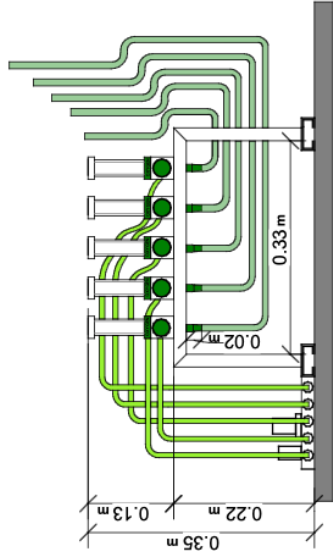
Balance de masa de proceso de boidegradabilidad de materiales



Nota. Se toma en cuenta únicamente la producción de dióxido de carbono de las muestras y el cambio de masa que tiene cada una luego de 45 días. Para el papel y la bolsa biodegradable, los datos del diagrama de flujo son los valores promedio de las tres muestras que se realizaron

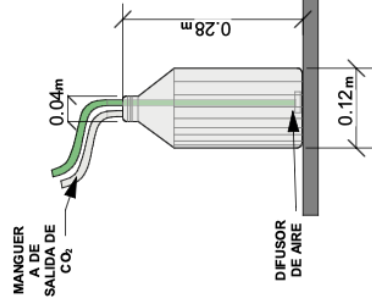


**MANIFOLD
ESCALA 1:2**

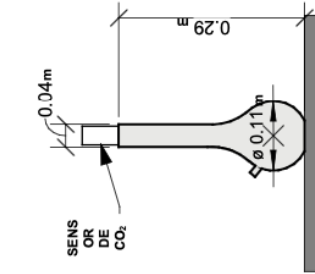


SIMBOLOGIA	
	MANGUERA DE O ₂
	MANGUERA DE O ₂
	MANGUERA DE CO ₂

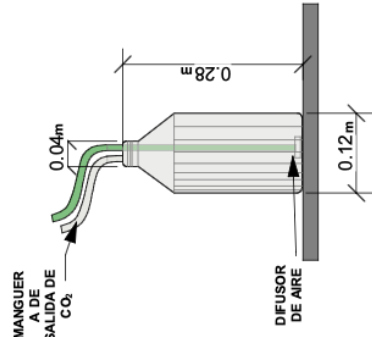
**SISTEMA DE BIODEGRAFIACIÓN
ESCALA 1:10**



**CAPTADOR DE CO2
ESCALA 1:10**



**FLUJOMETRO
ESCALA 1:10**



**FRASCOS DE SISTEMA
ESCALA 1:10**

C. Datos de placa

Cuadro 16

Datos de placa compresor de aire

Marca: Kaeser		
Potencia: 7.5 HP	Modelo: ABT 8	
Presión: 16 Bar	Entrada del aire: 3°C	Refrigerante: R-134a

Cuadro 17

Datos de placa controlador de temperatura

Marca: W3230		
Rango: de 0 a 100 ± 2 °C	Dimensiones: 0.18 x 0.25 cm	
Voltaje: 24V	Potencia: 250W	Frecuencia: 10A

Cuadro 18

Datos de placa sensor de dióxido de carbono

Marca: PASCO		
Rango: 0 a 100,000 ppm	Modelo: PS-3208	
Conexión: USB/Bluetooth	Temperatura operación: -10 a 50°C	Resolución equipo: 2 ppm

Cuadro 19

Datos de placa flujometros

Marca: Gastek	
Rango: de 0 a 15 litros por minuto	Modelo: Chemetron
Serie: 1-82-301	5,000 ciclos de mínimos de vida

D. Datos originales

Cuadro 20

Pesos iniciales de muestras a analizar

Material	Masa inicial (g) ± 0.01	Masa final (g) ± 0.01
PHA	10.0	8.54
Papel periódico	10.0	1.74
	10.0	1.39
	10.0	1.84
Bolsa biodegradable	10.0	10.0
	10.0	10.0
	10.0	10.0

Cuadro 21

Propiedades de los materiales a utilizar

Material	Tipo
Papel periódico	Celulosa
PHA	Plástico biodegradable
Bolsa biodegradable	Plástico biodegradable

Cuadro 22

Condiciones de operación del sistema

Temperatura	Depende del tiempo de prueba
Presión	Atmosférica
Humedad	50%

Nota. La temperatura del sistema cambia conforme se va desarrollando la metodología

Cuadro 23

Características de las partes del sistema de biodegradabilidad

Nombre del equipo	Características
Medidores de CO₂ PASCO	Rango de 0 a 100,000 ppm
Frascos Kimax	2,000mL; diámetro de entrada: 3cm diámetro: 12.5cm
Flujometros	0 a 15 LPM
Resistencia eléctrica	0.75kw y 0.40kw
Suministro de aire	Compresor de aire kaeser
Mangueras	0.64 cm (¼ in) 1.27 cm (½ in) 0.48 cm (3/16 in)

Cuadro 24

Condiciones de compost a utilizar

Material	Compost orgánico
Peso inicial (g)	600.0
pH	Neutro (7)
Antigüedad	4 meses
Tamaño de partícula (mm)	Mayor a 2mm

Nota. Solo el peso inicial de compost para el blanco es de 610.0 gramos

Cuadro 25

Datos originales de producción de dióxido de carbono

Datos	Fecha	Concentración de CO₂ del papel (ppm) ± 0.05	Concentración de CO₂ del blanco (ppm) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Hora
1	8/05/24	228	228	6	10:47:50 am
2	8/05/24	460	460	6	10:48:50 am
3	8/05/24	460	460	6	10:49:50 am
4	8/05/24	460	460	6	10:50:50 am
5	8/05/24	460	460	6	10:51:50 am
6	8/05/24	466	466	6	10:52:50 am
7	8/05/24	472	472	6	10:53:50 am
8	8/05/24	472	472	6	10:54:50 am
9	8/05/24	476	476	6	10:55:50 am
10	8/05/24	478	478	6	10:56:50 am
11	8/05/24	480	480	6	10:57:50 am
12	8/05/24	480	480	6	10:58:50 am
13	8/05/24	480	480	6	10:59:50 am
14	8/05/24	480	480	6	11:00:50 am
15	8/05/24	476	476	6	11:01:50 am
16	8/05/24	476	476	6	11:02:50 am
17	8/05/24	478	478	6	11:03:50 am
18	8/05/24	478	478	6	11:04:50 am
19	8/05/24	478	478	6	11:05:50 am
20	8/05/24	476	476	6	11:06:50 am
21	8/05/24	478	478	6	11:07:50 am
22	8/05/24	476	476	6	11:08:50 am
23	8/05/24	478	478	6	11:09:50 am
24	8/05/24	476	476	6	11:10:50 am
25	8/05/24	476	476	6	11:11:50 am
26	8/05/24	478	478	6	11:12:50 am
27	8/05/24	478	478	6	11:13:50 am
28	8/05/24	478	478	6	11:14:50 am
29	8/05/24	478	478	6	11:15:50 am
30	8/05/24	478	478	6	11:16:50 am
31	8/05/24	478	478	6	11:17:50 am
32	8/05/24	478	478	6	11:18:50 am
33	8/05/24	478	478	6	11:19:50 am
34	8/05/24	478	478	6	11:20:50 am
35	8/05/24	478	478	6	11:21:50 am

Datos	Fecha	Concentración de CO₂ del papel (ppm) ± 0.05	Concentración de CO₂ del blanco (ppm) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Hora
36	8/05/24	478	478	6	11:22:50 am
37	8/05/24	478	478	6	11:23:50 am
38	8/05/24	476	476	6	11:24:50 am
39	8/05/24	478	478	6	11:25:50 am
40	8/05/24	480	480	6	11:26:50 am
41	8/05/24	478	478	6	11:27:50 am
42	8/05/24	478	478	6	11:28:50 am
43	8/05/24	478	478	6	11:29:50 am
44	8/05/24	480	480	6	11:30:50 am
45	8/05/24	478	478	6	11:31:50 am
46	8/05/24	479	478	6	11:32:50 am
47	8/05/24	481	480	6	11:33:50 am
48	8/05/24	479	478	6	11:34:50 am
49	8/05/24	479	478	6	11:35:50 am
50	8/05/24	481	480	6	11:36:50 am
51	8/05/24	479	478	6	11:37:50 am
52	8/05/24	479	478	6	11:38:50 am
53	8/05/24	479	478	6	11:39:50 am
54	8/05/24	479	478	6	11:40:50 am
55	8/05/24	479	478	6	11:41:50 am
56	8/05/24	479	478	6	11:42:50 am
57	8/05/24	479	478	6	11:43:50 am
58	8/05/24	479	478	6	11:44:50 am
59	8/05/24	479	478	6	11:45:50 am
60	8/05/24	479	478	6	11:46:50 am
61	8/05/24	477	476	6	11:47:50 am
62	8/05/24	477	476	6	11:48:50 am
63	8/05/24	477	476	6	11:49:50 am
64	8/05/24	477	476	6	11:50:50 am
65	8/05/24	477	476	6	11:51:50 am
66	8/05/24	479	478	6	11:52:50 am
67	8/05/24	479	478	6	11:53:50 am
68	8/05/24	479	478	6	11:54:50 am
69	8/05/24	477	476	6	11:55:50 am
70	8/05/24	477	476	6	11:56:50 am
71	8/05/24	477	476	6	11:57:50 am
72	8/05/24	479	478	6	11:58:50 am

Datos	Fecha	Concentración de CO₂ del papel (ppm) ± 0.05	Concentración de CO₂ del blanco (ppm) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Hora
73	8/05/24	477	476	6	11:59:50 am
74	8/05/24	477	476	6	12:00:50 pm
75	8/05/24	477	476	6	12:01:50 pm
76	8/05/24	477	476	6	12:02:50 pm
77	8/05/24	477	476	6	12:03:50 pm
78	8/05/24	475	474	6	12:04:50 pm
79	8/05/24	477	476	6	12:05:50 pm
80	8/05/24	475	474	6	12:06:50 pm
81	8/05/24	475	474	6	12:07:50 pm
82	8/05/24	475	474	6	12:08:50 pm
83	8/05/24	475	474	6	12:09:50 pm
84	8/05/24	475	474	6	12:10:50 pm
85	8/05/24	473	472	6	12:11:50 pm
86	8/05/24	473	472	6	12:12:50 pm
87	8/05/24	473	472	6	12:13:50 pm
88	8/05/24	475	474	6	12:14:50 pm
89	8/05/24	475	474	6	12:15:50 pm
90	8/05/24	475	474	6	12:16:50 pm
91	8/05/24	473	472	6	12:17:50 pm
92	8/05/24	475	474	6	12:18:50 pm
93	8/05/24	475	474	6	12:19:50 pm
94	8/05/24	475	474	6	12:20:50 pm
95	8/05/24	473	472	6	12:21:50 pm
96	8/05/24	473	472	6	12:22:50 pm
97	8/05/24	471	470	6	12:23:50 pm
98	8/05/24	471	470	6	12:24:50 pm
99	8/05/24	471	470	6	12:25:50 pm
100	8/05/24	471	470	6	12:26:50 pm

Nota. Estos datos son un ejemplo del resto de datos que se tienen, que son 48,000 datos. Se usa como ejemplo el papel, pero son de la misma forma los de PHA y bolsa biodegradable. Se obtienen los datos a partir del sensor de dióxido de carbono y el Software Sparkvue

E. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Determinación de los litros requeridos de oxígeno para obtener el flujo deseado de alimentación de aire

Se parte de la indicación que da la norma de tener un flujo que logre tener un 6% en exceso de oxígeno y se utilizan como base 100 litros de oxígeno para el cálculo.

$$L_{RO_2} = B_{O_2} + L_{EO_2}$$

Donde:

L_{RO_2} = Litros requeridos de oxígeno

B_{O_2} = Base de litros de oxígeno

L_{EO_2} = Litros en exceso de oxígeno

Por tanto:

$$100 \text{ L } O_2 \text{ base} + 6 \text{ L } O_2 \text{ en exceso} = L_{RO_2}$$

$$L_{RO_2} = 106 \text{ L } O_2 \text{ requeridos}$$

Cálculo 2. Determinación de los litros adicionales requeridos para el flujo de alimentación de aire deseado

Se sabe que 100 litros de aire tienen 21 litros de O_2 por lo que con esto se procede a calcular los litros adicionales que se requieren para el flujo de alimentación. Los datos vienen del cálculo uno

$$L_{AO_2} = L_{RO_2} - L_{IO_2}$$

Donde:

L_{AO_2} = Litros adicionales de oxígeno

L_{RO_2} = Litros requeridos de oxígeno

L_{IO_2} = Litros iniciales de oxígeno en el aire

Por tanto:

$$106 \text{ L } O_2 \text{ requeridos} - 21 \text{ L } O_2 \text{ iniciales en aire} = L_{AO_2}$$

$$L_{AO_2} = 85 \text{ L } O_2 \text{ adicionales}$$

Cálculo 3. Determinación del flujo necesario de alimentación en el sistema

Se utiliza como base de cálculo 10 minutos para determinar el flujo y los litros adicionales. Los datos vienen del cálculo dos

$$F_0 = \frac{L_{AO_2}}{B_t}$$

Donde:

F_0 = Flujo de alimentación

L_{AO_2} = Litros adicionales de oxígeno

B_t = Base de cálculo de tiempo

Por tanto:

$$\frac{85 \text{ L de } O_2 \text{ adicionales}}{10 \text{ min}} = F_0$$

$$F_0 = 8.5 \text{ L de } O_2 \text{ por minuto}$$

Cálculo 4. Determinación de las dimensiones mínimas para el baño térmico

Se debían tener 5 frascos en el baño térmico y cada uno de estos tiene un diámetro de 12.5 centímetros.

$$L_{min} = F_{req} \times D_F$$

Donde:

L_{min} = Largo mínimo de la caja

F_{req} = Frascos requeridos en el sistema

D_F = Diámetro de cada uno de los frascos

Por tanto:

$$5 \times 12.5 \text{ cm} = L_{min}$$

$$L_{min} = 62.5 \text{ cm} \approx 63 \text{ cm}$$

Para el ancho se debe de tener al menos dos veces el diámetro, para poder tener los frascos cómodamente en la caja

$$A_{min} = 2 \times D_F$$

Donde:

A_{min} = Ancho mínimo de la caja

D_F = Diámetro de cada uno de los frascos

Por tanto:

$$2 \times 12.5 \text{ cm} = A_{min}$$

$$A_{min} = 25 \text{ cm}$$

Además, los frascos tienen una altura de 27cm, por lo que la caja no debe de ser mayor a esto.

Cálculo 5. Altura del frasco para dimensiones del captador de CO₂

Se sabe que para que se desarrolle el gas se necesita que el alto del contenedor sea 8 veces el diámetro del sensor medidor de dióxido de carbono y este es de 3.6 cm

$$A_F = 8 \times D_s$$

Donde:

A_F = Altura del frasco

D_s = Diámetro del sensor

Por tanto:

$$8 \times 3.6 \text{ cm} = A_F$$

$$A_F = 28.8 \text{ cm} \approx 29.0 \text{ cm}$$

Cálculo 6: Diámetro y volumen de la esfera el captador de CO₂

Para poder realizar la expansión del gas al inicio entra a una esfera que se toma como base que tiene 11 cm de diámetro esto para que cumpla con las condiciones para ser impreso

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Donde:

V = Volumen de la esfera

r = Radio de la esfera

Por tanto:

$$\frac{4}{3}\pi \times (5.5 \text{ cm})^3 = V$$

$$V = 23.04 \text{ cm}$$

Cálculo 7: Altura del cilindro para el captador de CO₂

Se sabe que la altura total para desarrollar el gas es de 29cm y la esfera tendrá una altura de 11 cm con esto se puede calcular la altura del cilindro

$$A_C = A_F - D_E$$

Donde:

A_C = Altura cilindro

A_F = Altura del frasco

D_E = Diámetro esfera

Por tanto:

$$29 \text{ cm} - 11 \text{ cm} = A_C$$

$$A_C = 18 \text{ cm}$$

Cálculo 8: Volumen del cilindro para el captador de CO₂

Sabiendo que la altura del cilindro es de 18 cm y que el diámetro del sensor es de 3.6 se puede buscar el volumen ya que el sensor tiene que encajar en la entrada del cilindro

$$V_C = \pi r_s^2 h$$

Donde:

V_C = Volumen del cilindro

r_s = radio del sensor

h = Altura del cilindro

Por tanto:

$$\pi \times (1.5 \text{ cm})^2 \times (18 \text{ cm}) = V_C$$

$$V_C = 127.2 \text{ cm}$$

Cálculo 9. Concentración real de CO₂ con base en el CO₂ del blanco de la muestra

Para determinar la masa producida de CO₂ se utiliza la concentración que presenta la muestra y el blanco. Se usa como ejemplo la muestra de papel el dato del 09 de mayo de 2024 a la 1:45:50

$$C_{CO_2r} = C_{CO_2m} - C_{CO_2b}$$

Donde:

C_{CO_2r} = Concentración de dióxido de carbono real

C_{CO_2m} = Concentración de dióxido de carbono de la muestra

C_{CO_2b} = Concentración de dióxido de carbono del blanco

Por tanto:

$$431 \text{ ppm} - 430 \text{ ppm} = C_{CO_2r}$$

$$C_{CO_2r} = 1 \text{ ppm}$$

Se obtiene que tiene se necesita una 1 ppm que es lo mismo que decir que se necesita 1mg/L

Cálculo 10. Liberación de CO₂ de la muestra

Para saber la liberación de CO₂ que tiene la muestra se utiliza el flujo empleado durante la prueba (6L/min) y la concentración de real de dióxido de carbono. Se obtiene el dato del cálculo 9

$$L_{CO_2} = C_{CO_2r} \times F_p$$

Donde:

L_{CO_2} = Liberación de dióxido de carbono

C_{CO_2r} = Concentración de dióxido de carbono real

F_p = Flujo de alimentación durante la prueba

Por tanto:

$$1 \frac{mg}{L} \times 6 \frac{L}{min} = L_{CO_2}$$

$$L_{CO_2} = 6 \frac{mg}{min}$$

Cálculo 11. Masa de CO₂ producida de la muestra

Con el tiempo que tenía para la obtención de muestras que era de 1 minuto se obtiene la más producida, se obtienen los datos del cálculo 10

$$m_{CO_2} = L_{CO_2} \times \Delta t$$

Donde:

m_{CO_2} = masa de dióxido de carbono producida

L_{CO_2} = Liberación de dióxido de carbono

Δt = cambio de tiempo de toma de muestras

Por tanto:

$$6 \frac{mg}{min} \times 1 \text{ min} = m_{CO_2}$$

$$m_{CO_2} = 6 \text{ mg}$$

Para tenerlo de una manera estándar se pasa a gramos

$$6 \text{ mg} \times \frac{1g}{1000mg} = m_{CO_2}$$

$$m_{CO_2} = 0.006g$$

Cálculo 12. Porcentaje de biodegradabilidad de la muestra

Con el peso inicial de las muestras y el peso final que estas presentan, se encuentra por medio de la diferencia la masa producida y el porcentaje de biodegradabilidad. Tomando como ejemplo la muestra de papel. Estos datos se obtienen de la

$$P_B = \frac{(M_0 - M_f)}{M_0} \times 100$$

Donde:

P_B = Porcentaje de biodegradabilidad

M_0 = Masa inicial de la muestra

M_f = Masa final de la muestra

Por tanto:

$$\frac{(10 \text{ g} - 1.66 \text{ g})}{10 \text{ g}} \times 100 = P_B$$

$$P_B = 83.4\%$$

F. Datos calculados

Cuadro 26

Flujo requerido para alimentación del sistema

Flujo requerido (L/min)	8.5
--------------------------------	-----

Nota. Este dato se obtiene a partir del cálculo 3 sección E del apéndice

Cuadro 27

Dimensiones mínimas de la caja

Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)
65	25	27

Nota. Estos datos se obtienen a partir del cálculo 4 sección E del apéndice

Cuadro 28

Dimensiones captador de CO₂

Alto total (cm)	29
Alto cilindro (cm)	18
Diámetro total (esfera) (cm)	11
Diámetro boquilla (cm)	3.5

Nota. Estos datos se obtienen a partir de los cálculos de 5 al 8 de la sección E del apéndice y se ven ejemplificados en la figura 30 sección I del apéndice

Cuadro 29

Producción de CO₂ del PHA a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	17	6	100	1	100	0.1
16	27	6	160	1	160	0.16
32	83	6	500	1	500	0.5
45	117	6	700	1	700	0.7
TOTAL						1.46

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de dióxido de carbono necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Se presentan los datos de las muestras de papel y bolsa biodegradable que se realizaron en triplicado para aumentar la confiabilidad de los datos obtenidos y poder realizar la prueba de hipótesis

Cuadro 30Producción de CO₂ del papel muestra No.1 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	217	6	1300	1	1300	1.3
16	543	6	3260	1	3260	3.26
32	388	6	2330	1	2360	2.33
45	228	6	1370	1	1370	1.37
TOTAL						8.26

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 31Producción de CO₂ del papel muestra No.2 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	163	6	980	1	980	0.98
16	555	6	3330	1	3330	3.33
32	457	6	2740	1	2740	2.74
45	260	6	1560	1	1560	1.56
TOTAL						8.61

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 32Producción de CO₂ del papel muestra No.3 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	158	6	950	1	950	0.95
16	535	6	3210	1	3210	3.21
32	433	6	2600	1	2600	2.6
45	233	6	1400	1	1400	1.4
TOTAL						8.16

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 33Producción de CO₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.1 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	0	6	0	1	0	0
16	0	6	0	1	0	0
32	-250	6	-1500	1	-1500	-1.5
45	-372	6	-2230	1	-2230	-2.23
TOTAL						-3.73

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 34Producción de CO₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.2 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.01	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	0	6	0	1	0	0
16	0	6	0	1	0	0
32	-180	6	-1080	1	-1080	-1.08
45	-250	6	-1500	1	-1500	-1.50
TOTAL						-2.58

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 35Producción de CO₂ de la Bolsa Biodegradable muestra No.3 a lo largo de la prueba

Día	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Flujo de aire (L/min) ± 0.25	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.04	Cambio de tiempo (min) ± 0.05	Masa producida de CO₂ (mg) ± 0.04	Masa producida de CO₂ (g) ± 0.04
3	0	6	0	1	0	0
16	0	6	0	1	0	0
32	-365	6	-2190	1	-2190	-2.19
45	-269	6	-1614	1	-1614	-1.61
TOTAL						-3.80

Nota. Se tiene un intervalo de 3 días al inicio ya que la producción de CO₂ necesita un tiempo de estabilización cuando se coloca el sistema. Estos datos vienen de los cálculos 9 al 11 de la sección E del apéndice que se obtienen gracias al sensor medidor de dióxido de carbono marca Pasco y los cálculos se obtienen gracias a Microsoft Excel.

Cuadro 36

Resultados de biodegradación de materiales en sistema de compostaje

Material	Masa muestra inicial (g) ± 0.01	Masa muestra final (g) ± 0.01	Masa perdida en la muestra (g) ± 0.01	Porcentaje de biodegradabilidad (% m/m) ± 0.01
Papel periódico	10	1.66	8.34	83.4
PHA	10	8.54	1.46	14.6
Bolsa Biodegradable	10	10	0	0.0

Nota. Los cálculos necesarios para saber la biodegradación de las muestras se encuentran en anexos sección E cálculo 12 del apéndice. La masa de las muestras tanto inicial como final se obtiene a partir de una balanza. Para el papel y la bolsa biodegradable, los datos de la tabla son los valores promedio de las 3 muestras que se realizaron.

Cuadro 37

Datos calculados de masa producida de dióxido de carbono

Datos	Fecha	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.25	masa de CO₂ producido (mg) ± 0.04	masa de CO₂ producido (g) ± 0.04
1	8/05/24	0	0	0	0.000
2	8/05/24	0	0	0	0.000
3	8/05/24	0	0	0	0.000
4	8/05/24	0	0	0	0.000
5	8/05/24	0	0	0	0.000
6	8/05/24	0	0	0	0.000
7	8/05/24	0	0	0	0.000
8	8/05/24	0	0	0	0.000
9	8/05/24	0	0	0	0.000
10	8/05/24	0	0	0	0.000
11	8/05/24	0	0	0	0.000
12	8/05/24	0	0	0	0.000
13	8/05/24	0	0	0	0.000
14	8/05/24	0	0	0	0.000
15	8/05/24	0	0	0	0.000
16	8/05/24	0	0	0	0.000
17	8/05/24	0	0	0	0.000

Datos	Fecha	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.25	masa de CO₂ producido (mg) ± 0.04	masa de CO₂ producido (g) ± 0.04
18	8/05/24	0	0	0	0.000
19	8/05/24	0	0	0	0.000
20	8/05/24	0	0	0	0.000
21	8/05/24	0	0	0	0.000
22	8/05/24	0	0	0	0.000
23	8/05/24	0	0	0	0.000
24	8/05/24	0	0	0	0.000
25	8/05/24	0	0	0	0.000
26	8/05/24	0	0	0	0.000
27	8/05/24	0	0	0	0.000
28	8/05/24	0	0	0	0.000
29	8/05/24	0	0	0	0.000
30	8/05/24	0	0	0	0.000
31	8/05/24	0	0	0	0.000
32	8/05/24	0	0	0	0.000
33	8/05/24	0	0	0	0.000
34	8/05/24	0	0	0	0.000
35	8/05/24	0	0	0	0.000
36	8/05/24	0	0	0	0.000
37	8/05/24	0	0	0	0.000
38	8/05/24	0	0	0	0.000
39	8/05/24	0	0	0	0.000
40	8/05/24	0	0	0	0.000
41	8/05/24	0	0	0	0.000
42	8/05/24	0	0	0	0.000
43	8/05/24	0	0	0	0.000
44	8/05/24	0	0	0	0.000
45	8/05/24	0	0	0	0.000
46	8/05/24	1	3	3	0.003
47	8/05/24	1	3	3	0.003
48	8/05/24	1	3	3	0.003
49	8/05/24	1	3	3	0.003
50	8/05/24	1	3	3	0.003
51	8/05/24	1	3	3	0.003
52	8/05/24	1	3	3	0.003
53	8/05/24	1	3	3	0.003

Datos	Fecha	Concentración real con base en CO₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Liberación de CO₂ (mg/min) ± 0.25	masa de CO₂ producido (mg) ± 0.04	masa de CO₂ producido (g) ± 0.04
54	8/05/24	1	3	3	0.003
55	8/05/24	1	3	3	0.003
56	8/05/24	1	3	3	0.003
57	8/05/24	1	3	3	0.003
58	8/05/24	1	3	3	0.003
59	8/05/24	1	3	3	0.003
60	8/05/24	1	3	3	0.003
61	8/05/24	1	3	3	0.003
62	8/05/24	1	3	3	0.003
63	8/05/24	1	3	3	0.003
64	8/05/24	1	3	3	0.003
65	8/05/24	1	3	3	0.003
66	8/05/24	1	3	3	0.003
67	8/05/24	1	3	3	0.003
68	8/05/24	1	3	3	0.003
69	8/05/24	1	3	3	0.003
70	8/05/24	1	3	3	0.003
71	8/05/24	1	3	3	0.003
72	8/05/24	1	3	3	0.003
73	8/05/24	1	3	3	0.003
74	8/05/24	1	3	3	0.003
75	8/05/24	1	3	3	0.003
76	8/05/24	1	3	3	0.003
77	8/05/24	1	3	3	0.003
78	8/05/24	1	3	3	0.003
79	8/05/24	1	3	3	0.003
80	8/05/24	1	3	3	0.003
81	8/05/24	1	3	3	0.003
82	8/05/24	1	3	3	0.003
83	8/05/24	1	3	3	0.003
84	8/05/24	1	3	3	0.003
85	8/05/24	1	3	3	0.003
86	8/05/24	1	3	3	0.003
87	8/05/24	1	3	3	0.003
88	8/05/24	1	3	3	0.003
89	8/05/24	1	3	3	0.003

Datos	Fecha	Concentración real con base en CO ₂ del blanco (mg/L) ± 0.05	Liberación de CO ₂ (mg/min) ± 0.25	masa de CO ₂ producido (mg) ± 0.04	masa de CO ₂ producido (g) ± 0.04
90	8/05/24	1	3	3	0.003
91	8/05/24	1	3	3	0.003
92	8/05/24	1	3	3	0.003
93	8/05/24	1	3	3	0.003
94	8/05/24	1	3	3	0.003
95	8/05/24	1	3	3	0.003
96	8/05/24	1	3	3	0.003
97	8/05/24	1	3	3	0.003
98	8/05/24	1	3	3	0.003
99	8/05/24	1	3	3	0.003
100	8/05/24	1	3	3	0.003

Nota. Estos datos son un ejemplo del resto de datos que se tienen, que son 48,000 datos. Se usa como ejemplo el papel, pero son de la misma forma los de PHA y bolsa biodegradable. Se obtienen los datos a partir del sensor de dióxido de carbono y el Software Sparkvue

Cuadro 38

Datos de prueba estadística para las distintas pruebas

	Papel periódico	Bolsa biodegradable
Media	83.43	-35.19
Desviación estándar	0.24	0.69
T calculada	0.97	-9.18
Criterio de decisión	t calculada > -6.69 aceptar Ho	t calculada ≤ -6.69 rechazar Ho
Decisión	Es biodegradable	No es biodegradable

Nota. Estos datos se obtienen de los análisis de error del 1 al 8 de la sección G del apéndice se hacen por medio de Microsoft Excel. Los datos de la tabla son los valores promedio de biodegradabilidad de las 3 muestras que se realizaron para cada tipo con los datos obtenidos por el sensor medidor de dióxido de carbono marca PASCO.

G. Análisis de error

Este análisis de error se hace tanto para la bolsa biodegradable como para el papel y se usa como ejemplo la bolsa biodegradable.

Análisis de error 1. Planteamiento de hipótesis nula y alternativa para prueba t de student

El valor aceptado para que un plástico pueda ser etiquetado como biodegradable bajo la norma ASTM D5338 es que este pierda 60% o mas del peso original de la muestra inicial. Se plantea la siguiente pregunta, ¿la muestra presenta una pérdida menor al 60%?

$$H_0 = \mu \geq 60$$

$$H_a = \mu < 60$$

Análisis de error 2. Nivel de significancia para prueba t de student

Debido a que se tienen muchos datos y no se puede tener un margen de aceptación muy grande para el rechazo de la hipótesis nula

$$\alpha = 0.01$$

Análisis de error 3. Promedio del triplicado de masa de dióxido de carbono producida por las muestras para prueba t de student

Se toma como ejemplo el porcentaje de biodegradabilidad a partir de la masa producida de dióxido de carbono por las 3 muestras que se pusieron de la bolsa biodegradable se obtiene un promedio del valor. Estos datos vienen del cálculo 12 de la sección E y el cuadro

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

\bar{x} = Promedio de la muestra

$\sum x_i$ = Sumatoria de los valores individuales

n = Número total de valores en la muestra

Por tanto:

$$\frac{(-37.30) + (-30.24) + (-38.04)}{3} = \bar{x}$$

$$\bar{x} = -35.19 \text{ g}$$

Análisis de error 4. Grados de libertad del del triplicado de masa de dióxido de carbono producida por las muestras de bolsa biodegradable

Se tienen tres datos de la masa producida por cada una de las muestras de bolsa biodegradable

$$GL = n - 1$$

Donde:

n = número de observaciones o muestras en el conjunto de datos

Por tanto:

$$3 - 1 = GL$$

$$GL = 2$$

Análisis de error 5. Desviación estandar muestral del triplicado de masa de dióxido de carbono producida por las muestras de bolsa biodegradable para prueba de t de student

Se toma como ejemplo la bolsa biodegradable y estos datos vienen del cálculo 12 de la sección E del apéndice y el análisis 3 de la sección G del apéndice.

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

s = Desviación estándar muestral

x_i = Sumatoria de los valores individuales

\bar{x} = Promedio de la muestra

n = Número total de valores en la muestra

Por tanto:

$$\sqrt{\frac{(-37.30 + 35.19)^2 + (-30.24 + 35.19)^2 + (-38.04 + 35.19)^2}{3 - 1}} = s$$

$$s = 0.24$$

Análisis de error 6. Cálculo de t de student

Se toma como ejemplo la bolsa biodegradable y estos datos vienen del análisis de error del 1 al 5 de la sección G del apéndice

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

Donde:

t = T de student

\bar{x} = Promedio de la muestra

μ = Promedio verdadero

s = Desviación estándar muestral

n = Número total de valores en la muestra

Por tanto:

$$\frac{-35.19 - 60}{17.94 / \sqrt{3}} = t$$
$$t = -9.19$$

Análisis de error 7. T de student crítica

A partir de Figura 15 de la sección H del apéndice, los grados de libertad y significancia se encuentra el valor de la t de student crítica

$$t_{critica} = -6.96$$

Como el punto de corte entre las zonas se encuentra a la izquierda del cero de la distribución, ver la figura 50 del apéndice sección I, el valor de t crítica es negativo.

Análisis de error 8. Criterios de decisión de la prueba t de student

t calculada > -6.69 aceptar Ho

t calculada \leq -6.69 rechazar Ho

Con los datos obtenidos se rechaza la Ho, la muestra no presenta un valor mayor de pérdida mayor al 60%. Por lo tanto, el material no puede ser considerado como biodegradable

Análisis de error 9. Promedio del triplicado de masa de dióxido de carbono producida por las muestras

Se toma como ejemplo la masa producida de dióxido de carbono por las 3 muestras que se pusieron de la bolsa biodegradable se obtiene un promedio del valor. Estos datos vienen de los cuadros 33, 34 y 35 de la sección D del apéndice.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

\bar{x} = Promedio de la muestra

$\sum x_i$ = Sumatoria de los valores individuales

n = Número total de valores en la muestra

Por tanto:

$$\frac{(-3.73) + (-3.02) + (-3.80)}{3} = \bar{x}$$

$$\bar{x} = -3.52 \text{ g}$$

Análisis de error 10. Desviación estandar muestral del triplicado de masa de dióxido de carbono producida por las muestras

Se toma como ejemplo la masa producida de dióxido de carbono por las 3 muestras que se pusieron de la bolsa biodegradable se obtiene un promedio del valor. Estos datos vienen de los cuadros 33, 34 y 35 de la sección D del apéndice y del análisis de error 9 de la sección G del apéndice.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

s = Desviación estándar muestral

x_i = Sumatoria de los valores individuales

\bar{x} = Promedio de la muestra

n = Número total de valores en la muestra

Por tanto:

$$\sqrt{\frac{(-3.73 + 3.52)^2 + (-3.02 + 3.52)^2 + (-3.80 + 3.52)^2}{3 - 1}} = s$$

$$s = 1.79$$

Análisis de error 11. Propagación de error en sumas y restas

Se toma como ejemplo los cálculos del Cuadro 13 de los resultados de biodegradación de materiales en sistema de compostaje. Este calculo se hace con las otras sumas o restas que se tengan de los cálculos

$$\Delta\bar{X} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}$$

(Skoog, *et. al*, 2015)

$\Delta\bar{X}$ es la incertidumbre del resultado

a, b, c... es la incertidumbre de cada medida

Por tanto:

$$\sqrt{0.01^2 + 0.01^2} = \Delta\bar{X}$$

$$\Delta\bar{X} = 0.01$$

Análisis de error 12. Propagación de error en multiplicaciones y divisiones

Se toma como ejemplo los cálculos del Cuadro 13 de los resultados de biodegradación de materiales en sistema de compostaje. Este cálculo se hace con las otras multiplicaciones o divisiones que se tengan de los cálculos

$$\frac{S_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{S_c}{c}\right)^2 \dots}$$

(Skoog, *et. Al*, 2015)

Donde:

S_y es Incertidumbre del resultado

y es el valor del resultado del cálculo

a, b, c... es el valor de cada medida

$S_{a,b,c\dots}$ es la incertidumbre de cada valor medido respectivo

Por tanto:

$$\sqrt{\left(\frac{10}{0.01}\right)^2 + \left(\frac{8.54}{0.01}\right)^2} = \frac{S_y}{y}$$

$$\frac{S_y}{y} = 0.0015$$

$$S_y = 0.0015 \times y$$

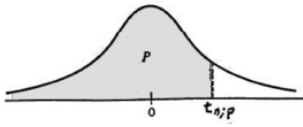
$$0.0015 \times 1.854 = S_y$$

$$S_y = 0.003$$

H. Tablas

Figura 17
Valores de t de student crítica con cola inferior

Distribución t de Student



La tabla A.4 da distintos valores de la función de distribución en relación con el número de grados de libertad; concretamente, relaciona los valores p y $t_{n,p}$ que satisfacen

$$P(t_n \leq t_{n,p}) = p.$$

n	$t_{0,55}$	$t_{0,60}$	$t_{0,70}$	$t_{0,80}$	$t_{0,90}$	$t_{0,95}$	$t_{0,975}$	$t_{0,99}$	$t_{0,995}$
1	0,1584	0,3249	0,7265	1,3764	3,0777	6,3138	12,7062	31,8205	63,6567
2	0,1421	0,2887	0,6172	1,0607	1,8856	2,9200	4,3027	6,9646	9,9248
3	0,1366	0,2767	0,5844	0,9785	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8409
4	0,1338	0,2707	0,5686	0,9410	1,5332	2,1318	2,7764	3,7469	4,6041
5	0,1322	0,2672	0,5594	0,9195	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321
6	0,1311	0,2648	0,5534	0,9057	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074
7	0,1303	0,2632	0,5491	0,8960	1,4149	1,8946	2,3646	2,9980	3,4995
8	0,1297	0,2619	0,5459	0,8889	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554
9	0,1293	0,2610	0,5435	0,8834	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498
10	0,1289	0,2602	0,5415	0,8791	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693
11	0,1286	0,2596	0,5399	0,8755	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058
12	0,1283	0,2590	0,5386	0,8726	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545
13	0,1281	0,2586	0,5375	0,8702	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123
14	0,1280	0,2582	0,5366	0,8681	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768
15	0,1278	0,2579	0,5357	0,8662	1,3406	1,7531	2,1314	2,6025	2,9467
16	0,1277	0,2576	0,5350	0,8647	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208
17	0,1276	0,2573	0,5344	0,8633	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982
18	0,1274	0,2571	0,5338	0,8620	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784
19	0,1274	0,2569	0,5333	0,8610	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609
20	0,1273	0,2567	0,5329	0,8600	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453
21	0,1272	0,2566	0,5325	0,8591	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314
22	0,1271	0,2564	0,5321	0,8583	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188
23	0,1271	0,2563	0,5317	0,8575	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073
24	0,1270	0,2562	0,5314	0,8569	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7969
25	0,1269	0,2561	0,5312	0,8562	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874
26	0,1269	0,2560	0,5309	0,8557	1,3150	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787
27	0,1268	0,2559	0,5306	0,8551	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707
28	0,1268	0,2558	0,5304	0,8546	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633
29	0,1268	0,2557	0,5302	0,8542	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564
30	0,1267	0,2556	0,5300	0,8538	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500
40	0,1265	0,2550	0,5286	0,8507	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045
50	0,1263	0,2547	0,5278	0,8489	1,2987	1,6759	2,0086	2,4033	2,6778
60	0,1262	0,2545	0,5272	0,8477	1,2958	1,6706	2,0003	2,3901	2,6603
80	0,1261	0,2542	0,5265	0,8461	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387
100	0,1260	0,2540	0,5261	0,8452	1,2901	1,6602	1,9840	2,3642	2,6259
120	0,1259	0,2539	0,5258	0,8446	1,2886	1,6577	1,9799	2,3578	2,6174
∞	0,126	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	1,960	2,327	2,576

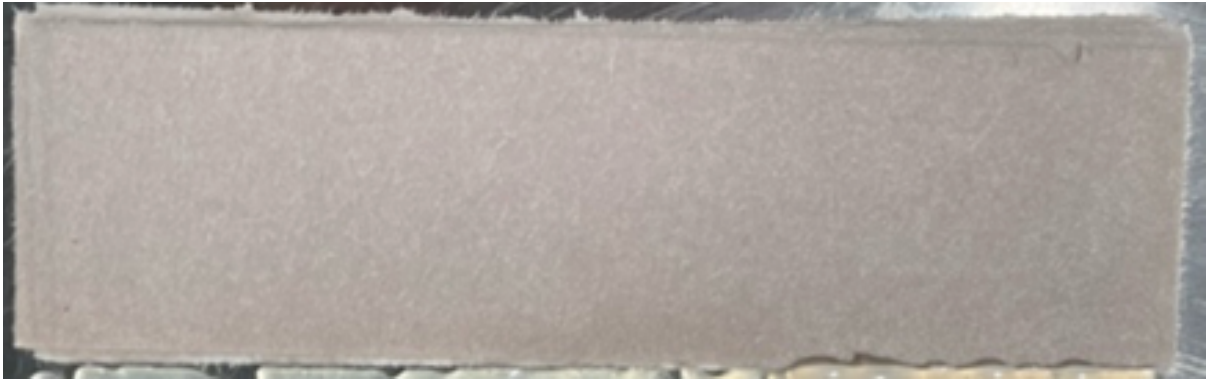
Tabla A.4: Tabla de la distribución t de Student.

Nota. Tabla extraída de estadística para negocios y economía, Anderson Sweeney onceava edición. N se refiere a los grados de libertad.

I. Imágenes

Figura 18

Muestra de papel periódico al inicio de la prueba



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 19

Muestra de papel periódico al final de la prueba



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 20

Muestra de PHA al inicio de la prueba



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 21

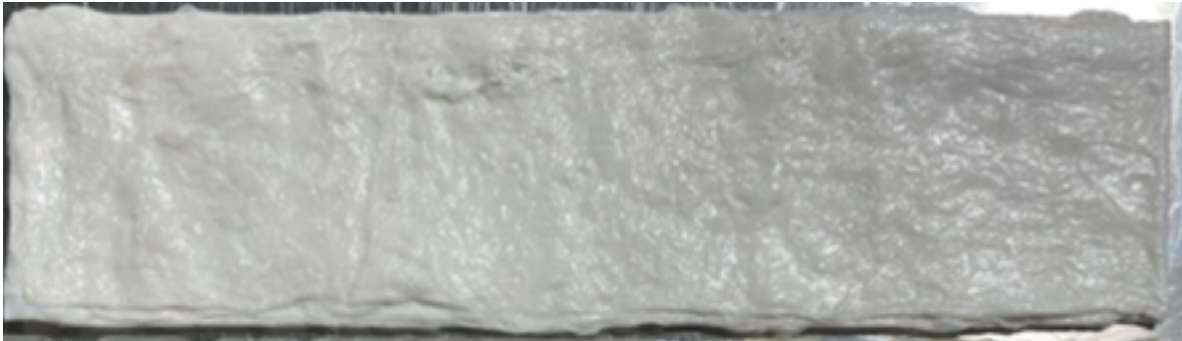
Muestra de PHA al final de la prueba



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 22

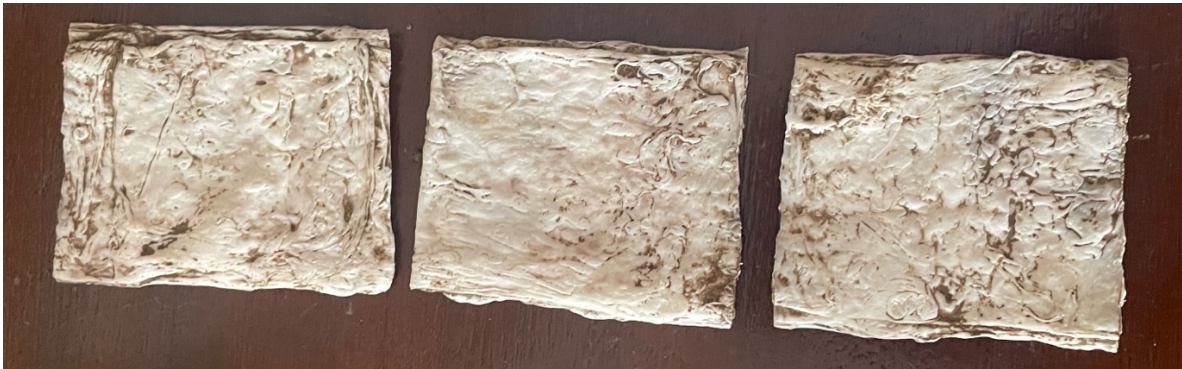
Muestra de bolsa biodegradable al inicio de la prueba



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 23

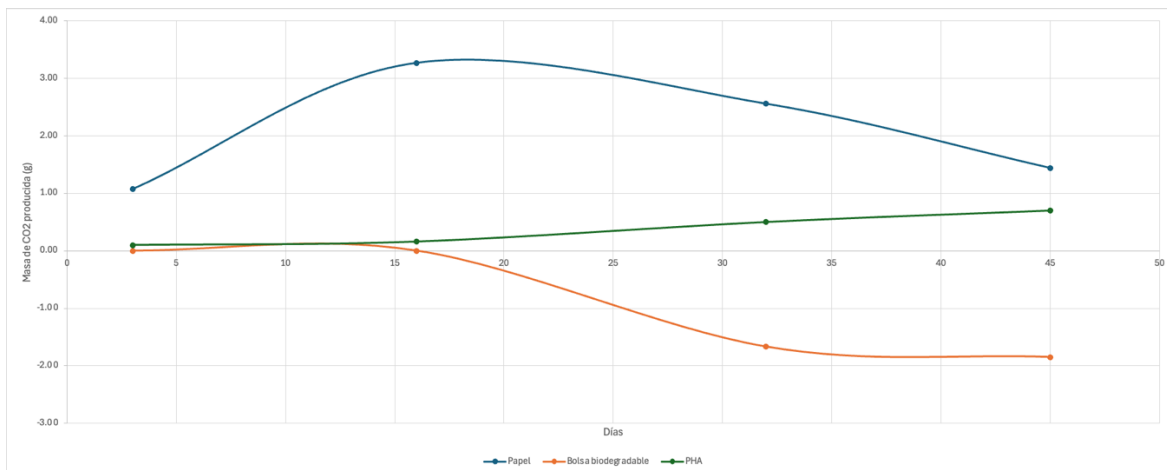
Muestra de bolsa biodegradable al final de la prueba



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 24

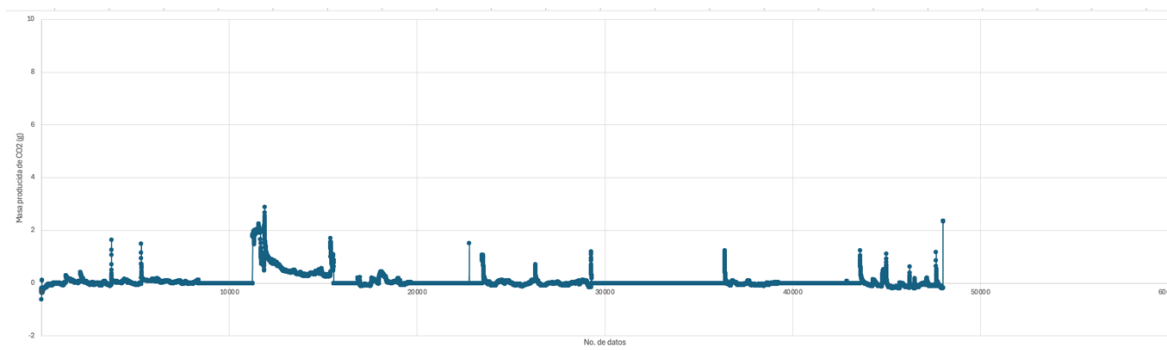
Producción de dióxido de carbono de las muestras resumidos



Nota. Fuente propia, generado por Microsoft Excel

Figura 25

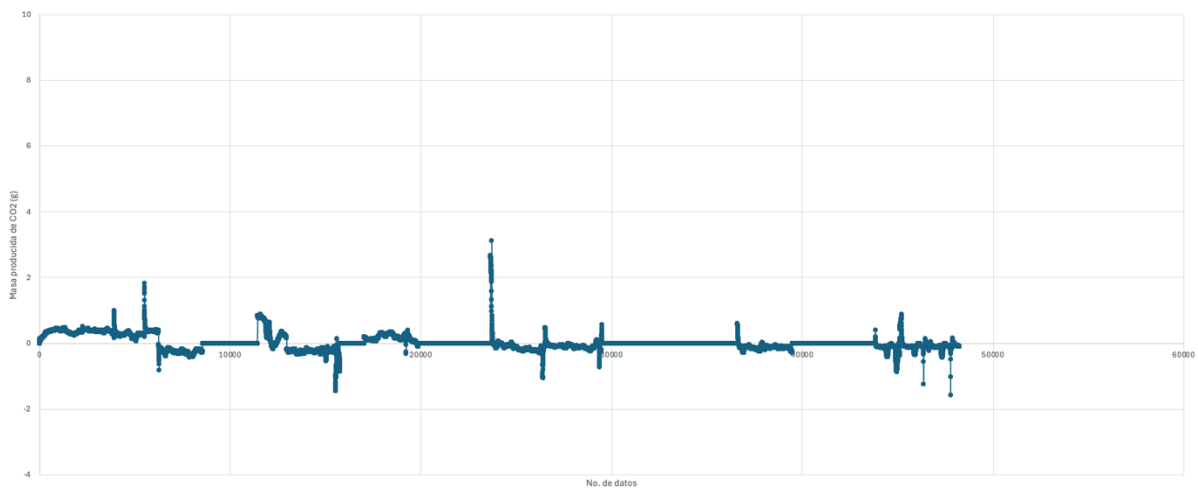
Datos de producción de dióxido de carbono para muestra de papel sin resumir



Nota. Fuente propia, generado por Microsoft Excel

Figura 26

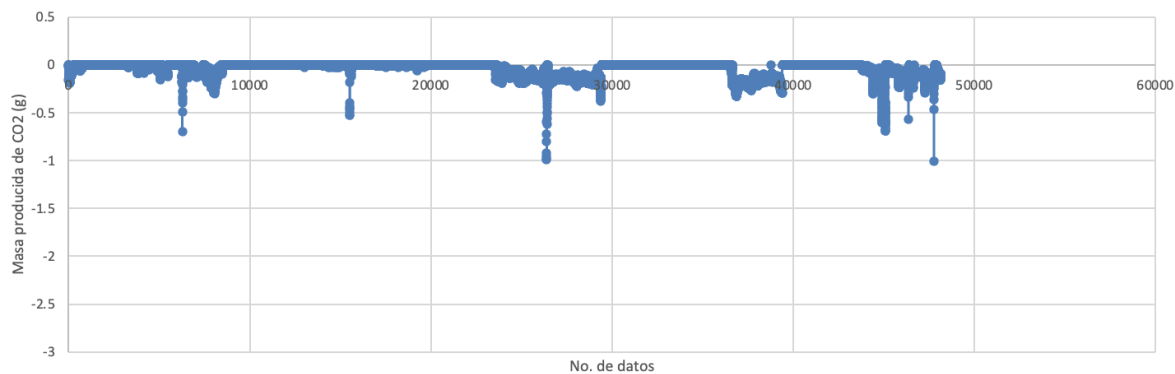
Datos de producción de dióxido de carbono para muestra de PHA sin resumir



Nota. Fuente propia, generado por Microsoft Excel

Figura 27

Datos de producción de dióxido de carbono para muestra de bolsa biodegradable sin resumir



Nota. Fuente propia, generado por Microsoft Excel

Figura 28

Sistema puesto en marcha en laboratorio de operaciones unitarias UVG



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 29

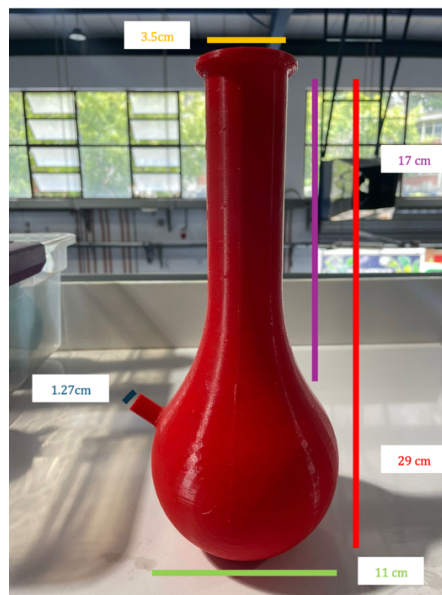
Frasco captador de dióxido de carbono



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 30

Frasco captador de dióxido de carbono con medidas



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 31

Frasco marca Kimax como sistema de degradación



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 32

Flujómetros vista frontal



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 33

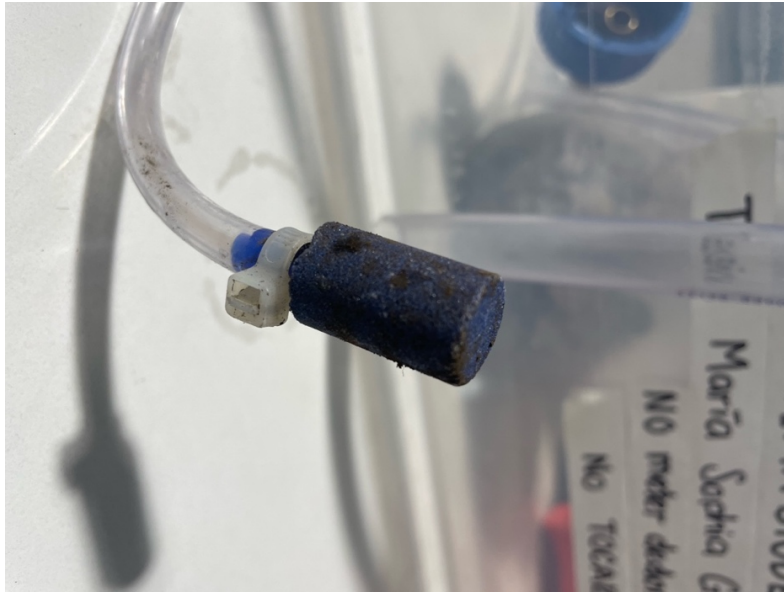
Flujómetros vista trasera



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 34

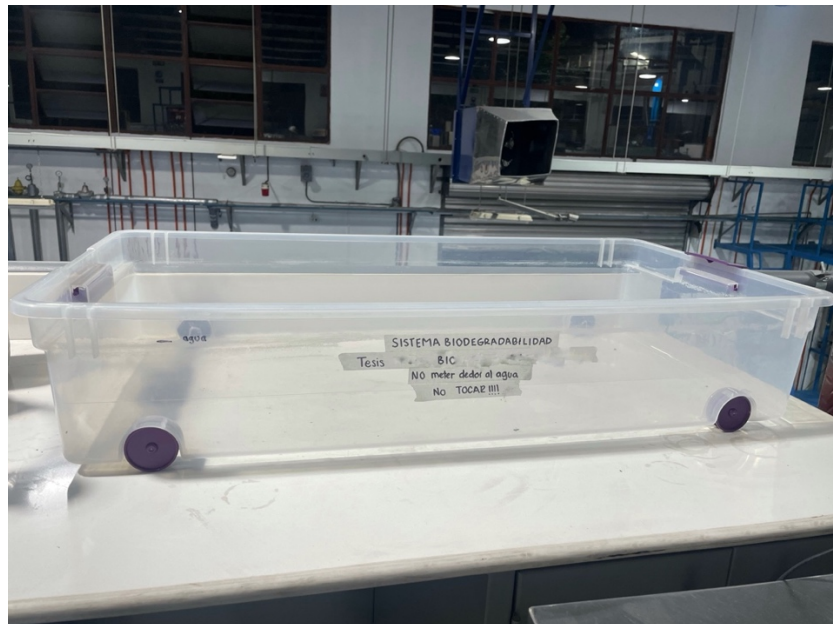
Difusor de aire



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 35

Caja para baño térmico



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 36

Resistencias utilizadas



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias. La resistencia grande es de 75kW y la pequeña de 0.40kW

Figura 37

Controlador de temperatura



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 38

Manifold con 5 puertos de salida



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 39

Medidor de pH y humedad



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 40

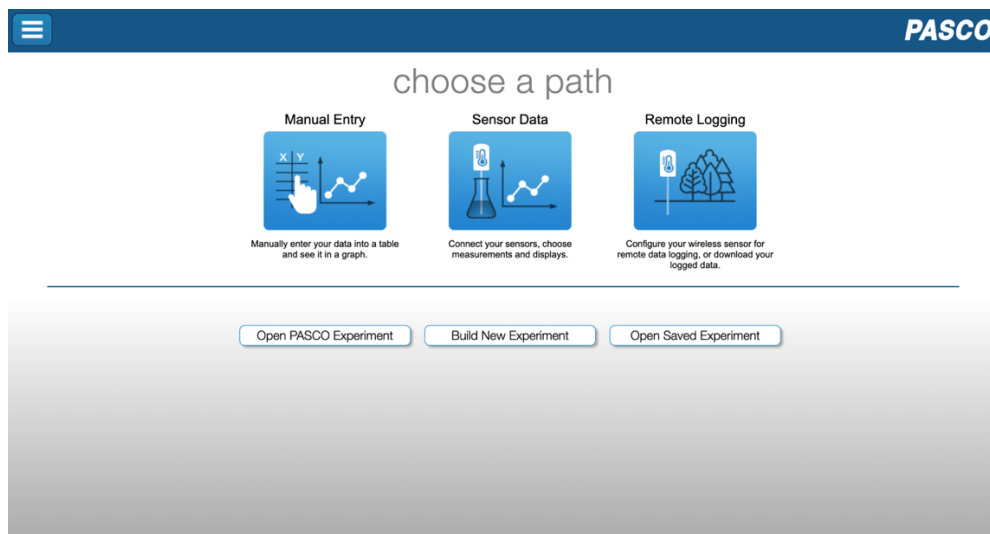
Sensor de dióxido de carbono



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 41

Remote Loggin para sensor PASCO



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 42

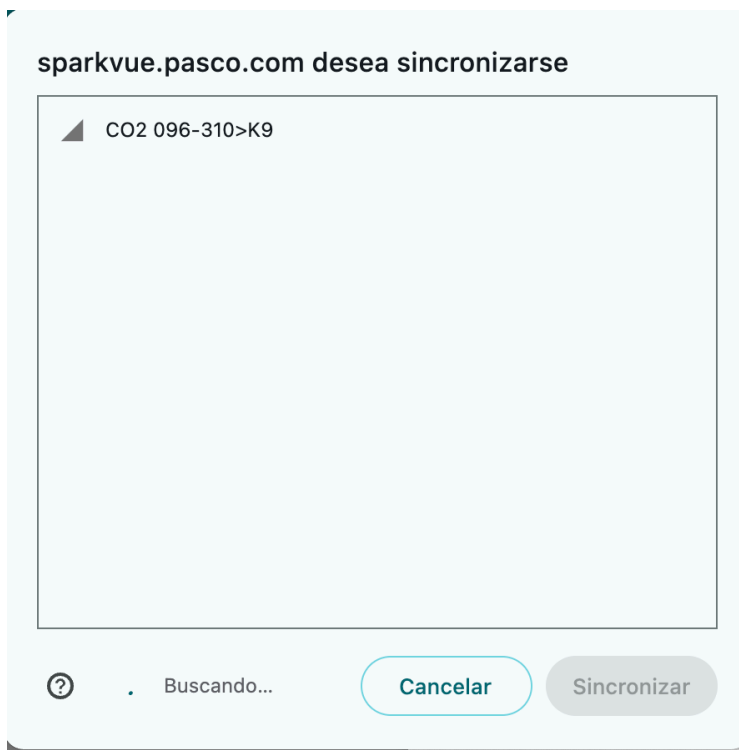
Wireless devices para sensor PASCO



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 43

Sensores medidores de CO₂ disponibles para conexión



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 44

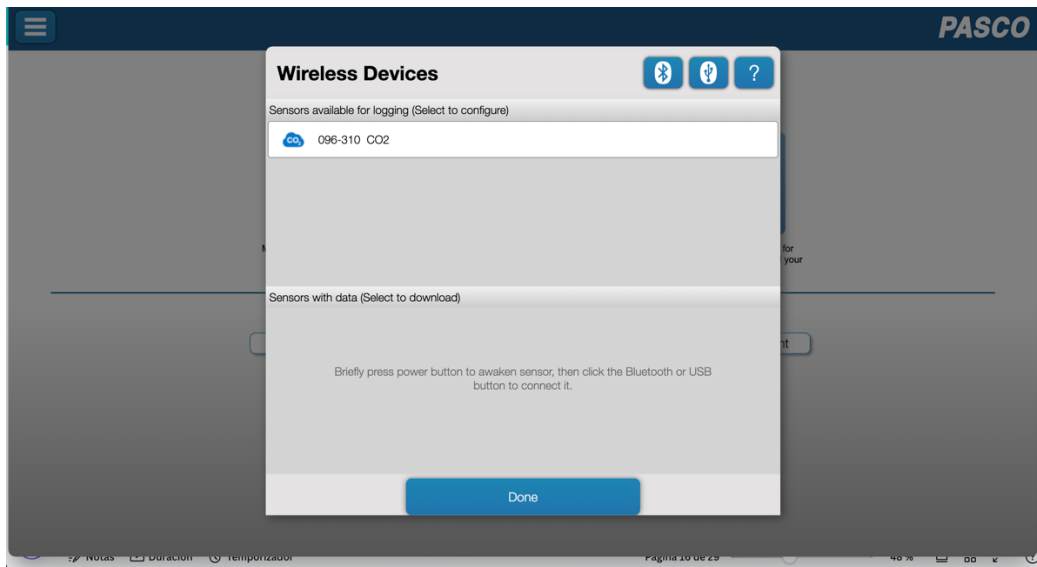
Número de serie del sensor medidor de CO₂



Nota. Fuente propia, en Universidad del Valle de Guatemala, laboratorio de operaciones unitarias

Figura 45

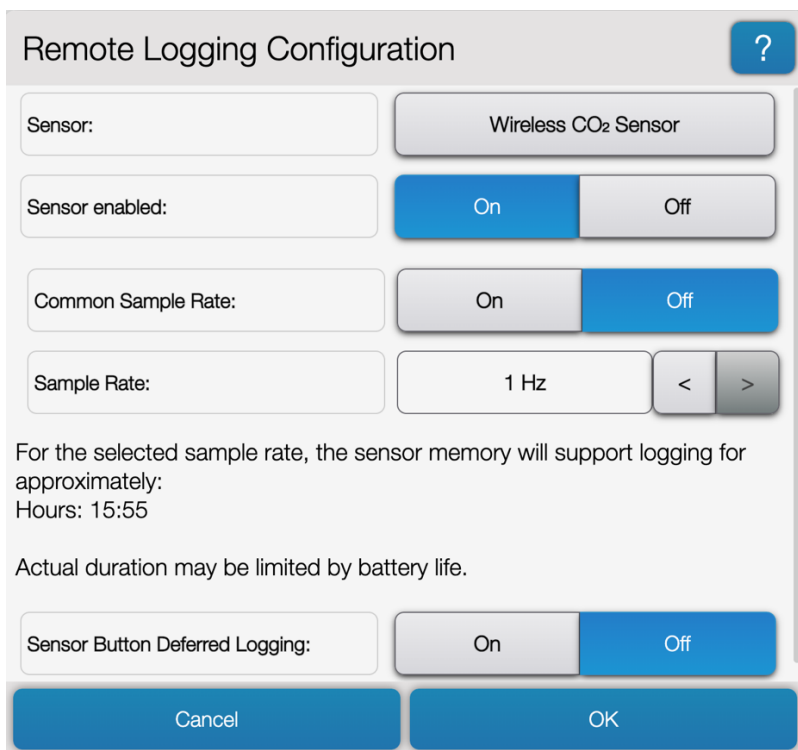
Sensores medidores de CO₂ disponibles para configurar



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 46

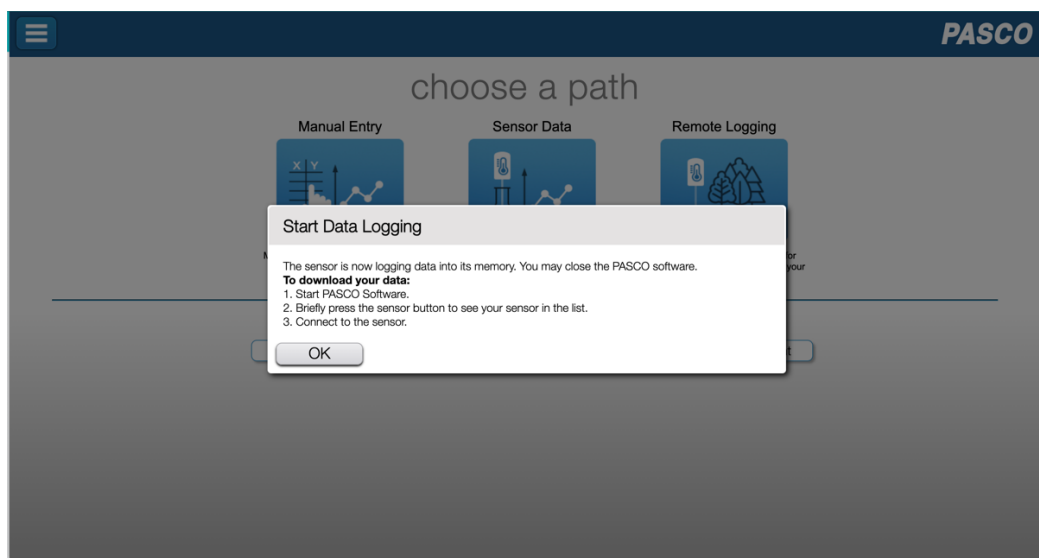
Configuración de los sensores medidores de CO₂



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 47

Sensor medidor de CO₂ almacenando datos



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 48

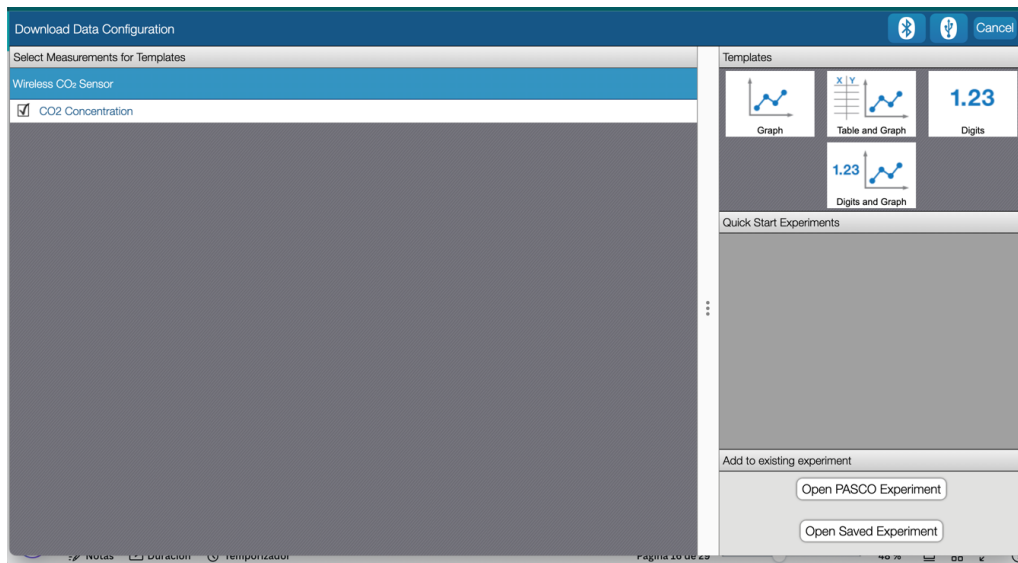
Sensores con información guardada del sensor medidor de CO₂



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 49

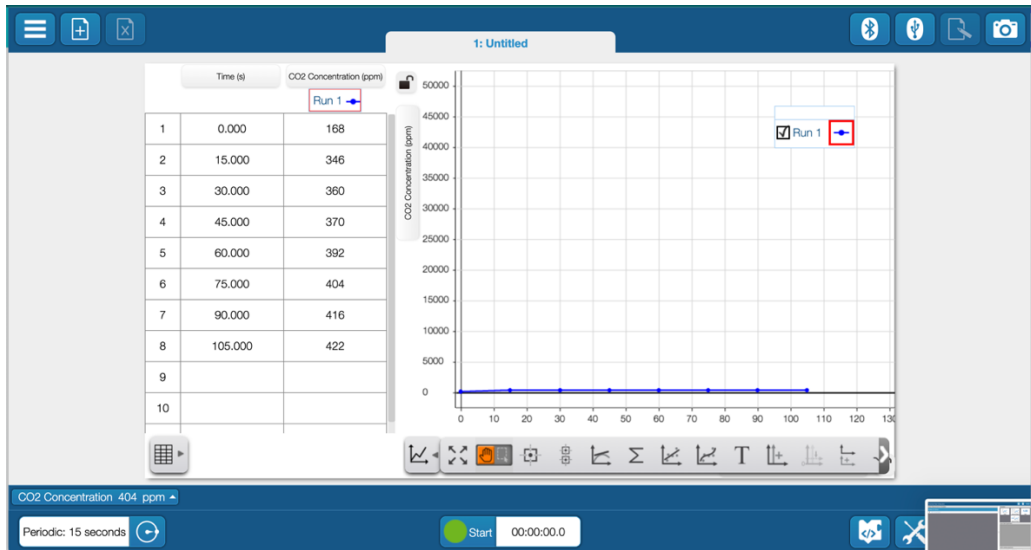
Forma para presentar datos del sensor medidor de CO₂



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 50

Datos presentados como tabla y gráfica del sensor medidor de CO₂



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 51

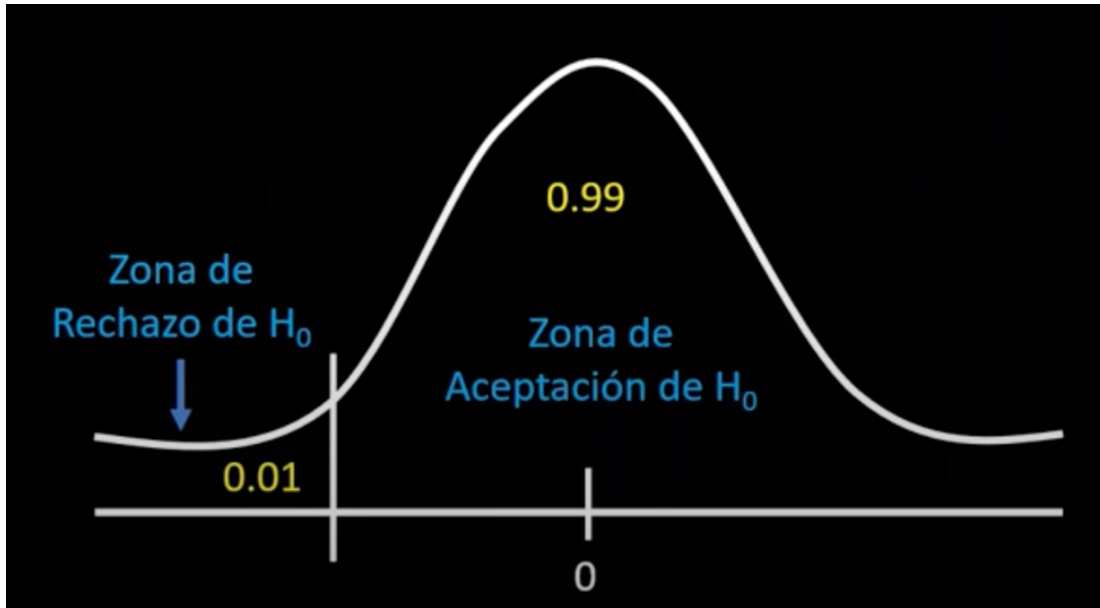
Menú de experimentación y opción para guardar datos del sensor medidor de CO₂



Nota. Fuente propia a partir del software Sparkvue online

Figura 52

Distribución de la prueba de t de student



Nota. Obtenido de Clase Estadística, 2020

XIII. Anexos

A. Norma ASTM original

ASTM STANDARDS PERTAINING TO THE BIODEGRADABILITY AND COMPOSTABILITY OF PLASTICS

Sponsored by Subcommittee D20.96 on Environmentally
Degradable Plastics



1999

Stock #: COMPOST

ASTM
100 Barr Harbor Drive,
West Conshohocken, PA 19428-2959

Editorial Staff

Director, Technical Publishing Services:

Roberta A. Storer

Manager, Standards Publications:

Joan L. Cornillot

Paula C. Fazio-Fluehr

Senior Indexer:

H. Joel Shupak

Editors:

Robert F. Allen

Nicole C. Baldini

Patricia E. Donofrio

Elizabeth L. Gutman

Eleanor Keefe

Joanne G. Kramer

Christine M. Leinweber

Vernice A. Mayer

Patricia A. McGee

Kathleen A. Peters

Susan Sandler

Todd J. Sandler

Richard F. Wilhelm

Editorial Assistants:

Audrey Lewandowski

Emilie A. Whealen

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

American Society for Testing and Materials.

ASTM standards pertaining to the biodegradability and
compostability of plastics / sponsored by Subcommittee
D20.96 on Environmentally Degradable Plastics.

p. cm.

Includes bibliographical references.

"ASTM Stock #: COMPOST."

ISBN 0-8031-2720-0

1. Plastics—Biodegradation—Standards. 2. Plastic
scrap—Deterioration. 3. Compost. I. ASTM Subcommittee D20.96 on
Environmentally Degradable Plastics. II. Title.

TD798.A47 1999

620.1'92323—dc21

99-35158

CIP

COPYRIGHT © 1999 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken, PA. All rights reserved. This material may not be reproduced or copied, in whole or in part, in any printed, mechanical, electronic, film, or other distribution and storage media, without the written consent of the publisher.

Photocopy Rights

Authorization to photocopy items for internal, personal, or educational classroom use, or the internal, personal, or educational classroom use of specific clients, is granted by the American Society for Testing and Materials (ASTM) provided that the appropriate fee is paid to the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: 978-750-8400; online: <http://www.copyright.com/>

Printed in Philadelphia, PA

July 1999

FOREWORD

This book is a compilation of the key documents that were developed by Subcommittee D20.96 on Environmentally Degradable Plastics for the testing and identification of plastics that will biodegrade and compost satisfactorily. These standards are based on the work initiated by International Standards Research at the request of ASTM as well as leading scientists in the U.S. and other parts of the world. The key standard is Specification D 6400-99. The other standards are referenced in Specification D 6400-99 and are necessary to meet the criteria listed in Specification D 6400-99.

This compilation contains the following standards:

- D 6400-99, Specification for Compostable Plastics, which (1) identifies plastics and products made from plastics designed to be composted in municipal and industrial aerobic composting facilities, and (2) determine if plastics and products made from plastics will compost satisfactorily, including biodegrading at a rate comparable to known compostable materials.
- D 6002-96, Guide for Assessing the Compostability of Environmentally Degradable Plastics, which outlines the recommended criteria, procedures, and a general approach to establish the compostability of plastics.
- D 5338-98, Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, which determines the degree and rate of aerobic biodegradation of plastic materials on exposure to a controlled-composting environment under laboratory conditions.
- D 6340-98, Test Methods for Determining Aerobic Biodegradation of Radiolabeled Plastic Materials in an Aqueous or Compost Environment, which are applicable for determining the degree and rate of aerobic biodegradation of plastics whose biodegradation rate is slow and requires test periods for as long as 365 days. These test methods require radiolabeling the selected carbon of the plastic polymer materials and monitoring the conversion of the radiolabeled carbon of the polymer to CO₂.

Suggestions and comments regarding this compilation are welcome and should be addressed to Product Manager, Publications, ASTM, 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428-2959.

ASTM

ASTM, founded in 1898, is a developer and publisher of technical information designed to promote the understanding and development of technology and to ensure the quality of commodities and services and safety of products.

ASTM's primary mission is to develop voluntary full consensus standards for materials, products, systems, and services. It provides a forum for producers, users, ultimate consumers, and those having a general interest (representatives of government and academia) to meet on common ground to write standards that best meet their needs.

CONTENTS

ASTM Standards:

		Page:
D 6400-99	Specification for Compostable Plastics	1
D 6002-96	Guide for Assessing the Compostability of Environmentally Degradable Plastics	4
D 5338-98	Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions	10
D 6340-98	Test Methods for Determining Aerobic Biodegradation of Radiolabeled Plastic Materials in an Aqueous or Compost Environment	16
Committee D-20 Membership Application		23



Standard Specification for Compostable Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 6400; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This specification covers plastics and products made from plastics that are designed to be composted in municipal and industrial aerobic composting facilities.

1.2 This specification is intended to establish the requirements for labeling of materials and products, including packaging made from plastics, as “compostable in municipal and industrial composting facilities.”

1.3 The properties in this specification are those required to determine if plastics and products made from plastics will compost satisfactorily, including biodegrading at a rate comparable to known compostable materials. Further, the properties in the specification are required to assure that the degradation of these materials will not diminish the value or utility of the compost resulting from the composting process.

1.4 The following safety hazards caveat pertains to the test methods portion of this standard: *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate health and safety practices and to determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 1—No equivalent ISO specifications exist for this standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 883 Terminology Relating to Plastics²

D 5338 Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions³

D 6002 Guide for Assessing the Compostability of Environmentally Degradable Plastics³

2.2 Organization for Economic Development (OECD) Standard:⁴

OECD Guideline 208 Terrestrial Plants, Growth Test

2.3 Association Francaise de Normalisation (CEN) Standard:⁵

CEN/TC 261/SC 4 N 99 Packaging—Requirements for Packaging Recoverable through Composting and Biodegradation—Test Scheme and Evaluation Criteria for the Final Acceptance of Packaging (WI 261 236)

2.4 ISO Standard:⁵

ISO 14855 Evaluation of the Ultimate Aerobic Biodegradability and Disintegration of Plastics under Controlled Composting Conditions—Method by Analysis of Evolved Carbon Dioxide

2.5 Government Standard:⁶

40 CFR Part 503.13 Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions appearing in this specification are found in Terminology D 883, unless otherwise noted.

3.1.1 *biodegradable plastic*—a degradable plastic in which the degradation results from the action of naturally occurring microorganisms such as bacteria, fungi, and algae.

3.1.2 *compostable plastic*—a plastic that undergoes degradation by biological processes during composting to yield CO₂, water, inorganic compounds, and biomass at a rate consistent with other known compostable materials and leave no visible, distinguishable or toxic residue.

3.1.3 *composting*⁷—a managed process that controls the biological decomposition and transformation of biodegradable materials into a humus-like substance called compost: the aerobic mesophilic and thermophilic degradation of organic matter to make compost; the transformation of biologically decomposable material through a controlled process of biooxidation that proceed through mesophilic and thermophilic phases and results in the production of carbon dioxide, water, minerals, and stabilized organic matter (compost or humus).

3.1.3.1 *Discussion*—Composting uses a natural process to stabilize mixed decomposable organic material recovered from municipal solid waste, yard trimmings, biosolids (digested sewage sludge), certain industrial residues and commercial residues.

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.96 on Environmentally Degradable Plastics.

Current edition approved April 10, 1999. Published May 1999.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.03.

⁴ Available from Organization for Economic Development, Director of Information, 2 rue Andre' Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

⁵ Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

⁶ *Code of Federal Regulations*, available from U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402.

⁷ *Compost Facility Operating Guide*, Composting Council, Alexandria, VA, 1995.

3.1.4 *degradable plastic*—a plastic designed to undergo a significant change in its chemical structure under specific environmental conditions, resulting in a loss of some properties that may be measured by standard test methods appropriate to the plastic and the application in a period of time that determines its classification.

3.1.5 *plastic*—a material that contains as an essential ingredient one or more organic polymeric substances of large molecular weight, is solid in its finished state, and, at some stage in its manufacture or processing into finished articles, can be shaped by flow.

3.1.6 *polymer*—a substance consisting of molecules characterized by the repetition (neglecting ends, branch junctions, other minor irregularities) of one or more types of monomeric units.

4. Classification

4.1 The purpose of this specification is to establish standards for identifying products and materials that will compost satisfactorily in commercial and municipal composting facilities. Products meeting the requirements outlined below are appropriate for labeling as “compostable” in accordance with the guidelines issued by the Federal Trade Commission.⁸

5. Basic Requirements

5.1 In order to compost satisfactorily, a product or material must demonstrate each of the characteristics found in 5.1.1-5.1.3, and which are quantified in Section 6.

5.1.1 *Disintegration During Composting*—A plastic product or material will disintegrate during composting such that any remaining plastic residuals are not readily distinguishable from the other organic materials in the finished product. Additionally, the material or product must not be found in significant quantities during screening prior to final distribution of the compost.

5.1.2 *Inherent Biodegradation*—A level of inherent biodegradation shall be established by tests under controlled conditions, that are comparable to known compostable materials.

5.1.3 *No Adverse Impacts on Ability of Compost to Support Plant Growth*—The tested materials shall not adversely impact on the ability of composts to support plant growth, when compared to composts using cellulose as a control, once the finished compost is placed in soil. Additionally, the polymeric products or materials must not introduce unacceptable levels of heavy metals or other toxic substances into the environment, upon sample decomposition.

NOTE 2—For a better understanding of why these criteria are important, the reader should consult Guide D 6002 *Compost Facility Operating Guide*,⁷ and CEN/TC 261/SC 4 N 99.

6. Detailed Requirements

6.1 In order to be identified as compostable, products must pass the requirements of 6.2, 6.3, and 6.4 using the appropriate laboratory tests, representative of the conditions found in aerobic composting facilities. Products and finished articles

should be tested in the same form as they are intended to be used. For products that are made in multiple thicknesses or densities, such as films, containers and foams, only the thickest or most dense products need to be tested as long as the chemical composition and structure remains otherwise the same. It is assumed that thinner gages and lower densities will also compost satisfactorily. Similarly, if additives are present in test samples that pass testing, lower levels of the same additives are similarly passed.

6.2 A plastic product is considered to have demonstrated satisfactory disintegration if after controlled laboratory-scale composting, found in 7.2.1 of Guide D 6002, no more than 10 % of its original dry weight remains after sieving on a 2.0-mm sieve.

6.3 A plastic product must demonstrate a satisfactory rate of biodegradation by achieving one of the following ratios of conversion to carbon dioxide found in 6.3.1, 6.3.2 or 6.3.3, within the time periods specified in 6.3.3.1 or 6.3.3.2, using Test Method D 5338 as outlined in 7.3.1 and 7.3.3 of Guide D 6002:

6.3.1 For products consisting of a single polymer (homopolymers or random copolymers), 60 % of the organic carbon must be converted to carbon dioxide by the end of the test period (see 6.3.4), when compared to a known reference material as outlined in 7.3.2 of Guide D 6002.

6.3.2 For products consisting of more than one polymer (block copolymers, segmented copolymers, blends, or addition of low molecular weight additives), 90 % of the organic carbon must be converted to carbon dioxide by the end of the test period (see 6.3.4), when compared to a known reference material as outlined in 7.3.2 of Guide D 6002.

6.3.3 For products consisting of more than one polymer, each individual polymer component, present at more than 1 % concentration, must achieve the 60 % specification for homopolymers, as described in 6.3.1.

6.3.3.1 For materials that are not radiolabeled, the test period shall be no greater than 180 days.

6.3.3.2 If radiolabeled materials are used, then the test period may be as long as 365 days.

NOTE 3—While the end points of biodegradation may include incorporation into biomass or humic substances as well as carbon dioxide, no recognized standard test methods and specifications exist to quantify these outcomes. When these tests and specifications become available, this standard will be revised.

6.4 A plastic product can demonstrate satisfactory terrestrial and aquatic safety if it fulfills the following requirements:

6.4.1 The plastic or product shall have concentrations of heavy metals less than 50 % of those prescribed in 40 CFR Part 503.13, and

6.4.2 The plastic or product shall fulfill the requirements of the tests found in 7.5.2.2 and 7.5.2.3 of Guide D 6002, including the cress seed test for plant germination and a plant growth test following OECD Guideline 208.

7. Sampling

7.1 Sampling shall be conducted as indicated in the specified test method.

⁸ *Guidelines for the Use of Environmental Marketing Claims*, Federal Trade Commission, Washington, DC, 1992.

8. Specimen Preparation

8.1 Specimen preparation shall be in accordance with the specified test method.

9. Marking and Labeling

9.1 Marking and labeling shall conform to national and local regulations.

10. Keywords

10.1 biodegradable; compostable plastic; composting; degradable plastics; labeling

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

Standard Guide for Assessing the Compostability of Environmentally Degradable Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 6002; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This guide covers suggested criteria, procedures, and a general approach to establish the compostability of environmentally degradable plastics.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics²
- D 882 Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheetings²
- D 883 Terminology Relating to Plastics²
- D 3593 Test Method for Molecular Weight Averages/Distribution of Certain Polymers by Liquid Size-Exclusion Chromatography (Gel Permeation Chromatography (GPC)) Using Universal Calibration³
- D 5152 Practice for Water Extraction of Residual Solids from Degraded Plastics for Toxicity Testing⁴
- D 5209 Test Method for Determining the Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in the Presence of Municipal Sewer Sludge⁴
- D 5247 Test Method for Determining the Aerobic Biodegradability of Degradable Plastics by Specific Microorganisms⁴
- D 5338 Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions⁴
- D 5509 Practice for Exposing Plastics to a Simulated Compost Environment⁴
- D 5512 Practice for Exposing Plastics to a Simulated Compost Environment Using an Externally Heated Reactor⁴
- D 5951 Practice for Preparing Residual Solids Obtained After Biodegradability Standard Methods for Plastics in Solid Waste for Toxicity and Compost Quality Testing⁴
- D 5988 Test Method for Determining the Aerobic Biodegradation in Soil of Plastic Materials or Residual Plastic Materials after Composting⁴

E 1440 Guide for an Acute Toxicity Test with the Rotifer *Brachionus*⁵

E 1720 Test Method for Determining Ready, Ultimate, Biodegradability of Organic Chemicals in a Sealed Vessel CO₂ Production Test⁵

G 22 Practice for Determining Resistance of Plastics to Bacteria⁶

2.2 ORCA Document:

Guidelines for the Evaluation of Feedstock for Source Separated Biowaste Composting and Biogasification⁷

2.3 OECD Guidelines:⁸

OECD Guideline 207 Earthworm, Acute Toxicity Tests

OECD Guideline 208 Terrestrial Plants, Growth Test

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *biodegradable plastic*—a degradable plastic in which the degradation results from the action of naturally occurring microorganisms such as bacteria, fungi, and algae. **D 883**

3.1.2 *compostable*—capable of undergoing biological decomposition in a compost site as part of an available program, such that the material is not visually distinguishable and breaks down into carbon dioxide, water, inorganic compounds, and biomass, at a rate consistent with known compostable materials.

3.1.3 *composting*—a managed process that controls the biological decomposition and transformation of biodegradable material into a humus-like substance called compost; the aerobic mesophilic and thermophilic degradation of organic matter to make compost; the transformation of biologically decomposable material through a controlled process of bio-oxidation that proceeds through mesophilic and thermophilic phases and results in the production of carbon dioxide, water, minerals, and stabilized organic matter (compost or humus). Composting uses a natural process to stabilize mixed decomposable organic material recovered from municipal solid waste, yard trimmings, biosolids (digested sewage sludge), certain industrial residues, and commercial residues **(1)**.⁹

3.1.4 *degradable plastic*—a plastic designed to undergo a significant change in its chemical structure under specific

¹ This guide is under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.96 on Environmentally Degradable Plastics.

Current edition approved Aug. 10, 1996. Published October 1996.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

³ *Discontinued*—See 1992 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.03.

⁴ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.03.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.05.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

⁷ Available from Organic Reclamation and Composting Association, Avenue E. Mounier 83, Box 1, B-1200 Brussels, Belgium.

⁸ Available from Organization for Economic Development, Director of Information, 2 rue Andre' Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

⁹ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this guide.

environmental conditions, resulting in a loss of some properties that may be measured by standard methods appropriate to the plastic and the application in a period of time that determines its classification. **D 883**

3.1.5 *mesophilic phase*—the phase of composting that occurs between 20 and 45°C (68 and 113°F) (1).

3.1.6 *plastic*—a material that contains as an essential ingredient one or more organic polymeric substances of large molecular weight, is solid in its finished state, and, at some stage in its manufacture or processing into finished articles, can be shaped by flow. **D 883**

3.1.7 *polymer*—a substance consisting of molecules characterized by the repetition (neglecting ends, branch junctions, and other minor irregularities) of one or more types of monomeric units. **D 883**

3.1.8 *thermophilic phase*—the phase in the composting process that occurs between 45 and 75°C (113 and 167°F); it is associated with specific colonies of microorganisms that accomplish a high rate of decomposition (1).

4. Summary of Guide

4.1 This guide uses a tiered criteria-based approach to assess the compostability of environmentally degradable plastic products (processed material containing polymeric materials, processing additives, and other additives required to meet performance requirements).

4.1.1 This guide includes methods that simulate mesophilic and thermophilic conditions that are representative of composting processes and compost end use.

4.1.2 The tiers progress from rapid screening of polymeric materials and other organic components to relatively long-term, more complex/higher cost evaluations. This guide will allow one to focus the correct level of resources on materials of greatest interest and potential.

4.1.3 Each tier in this guide includes objectives and a summary that presents potential test methods, method principles, test duration, implication of results, and suggested priority.

NOTE 1—The availability of other test methods appropriate for this guide is acknowledged.

NOTE 2—See Fig. 1 for a description of this guide in flow-chart form.

5. Significance and Use

5.1 Plastics that are designed to degrade after use have been developed. These materials are intended to enhance existing solid waste landfill diversion programs by allowing difficult to recycle materials to be collected and processed in alternative solid waste disposal systems. Composting has emerged as a viable approach to process these materials and the organic fraction of municipal solid waste (MSW). A comprehensive testing program is needed to establish the compostability (for example, fragmentation rate, biodegradation rate, and safety) of these materials.

5.2 This guide can be adapted to generate product-specific evidence for the substantiation of compostable claims to obtain classification as a compostable product.

NOTE 3—State and local regulations should also be considered.

6. Tier 1: Rapid Screening Tests

6.1 In this tier, rapid screening level studies are per-

formed, under mesophilic conditions, to obtain information unavailable from literature review. The objectives are as follows:

6.1.1 To determine whether biodegradation of polymeric materials and other organic components in the plastic product can occur. Biodegradation is based on carbon dioxide production.

6.1.2 To expand understanding of the degradation mechanism.

NOTE 4—A positive result in Tier 1 tests is not required to demonstrate the compostability of product components. Components which fail Tier 1 tests might prove successful in Tier 2 composting tests. If a component fails Tier 1, but is still considered promising, it should advance to Tier 2. Likewise, a promising component could enter the test strategy directly at Tier 2.

NOTE 5—Chemical analysis, (for example, regulated heavy metals) of product component may be appropriate prior to initiation of testing.

6.2 The following test methods are suggested for initial screening of polymeric materials, monomeric subunits of the polymer, and other organic components.

6.2.1 *Test Method D 5209 (Sturm Test)*—This aqueous test method uses a fresh sample of activated sewage sludge that has been aerated, homogenized, and settled. The supernatant is used as the inoculum. It contains primarily a mixed bacterial population that promotes rapid biodegradation under mesophilic conditions. The metabolism of test materials produces CO₂, which is trapped in alkali solution and quantitated by titration. The test length is typically 30 days, but it can be extended if the medium is reinoculated. A positive result (recovery of 60 % + of theoretical CO₂) usually indicates that the material will also biodegrade in a composting environment. A negative result should be confirmed by a laboratory thermophilic composting test such as Test Method D 5338. The contribution of nonmicrobial degradation can be quantified by including sterile or poison controls and comparing changes in molecular weight or mass.

6.2.2 *Soil Contact Test (Test Method D 5988)*—This static test uses a defined sand/soil/mature compost matrix to provide a consortium of mesophilic and thermophilic bacteria and fungi. Biodegradation is measured in a manner similar to the Sturm test, based on the amount of material carbon converted to gaseous carbon (CO₂). Readily biodegradable materials can be screened in 30 to 60 days. A negative result should be confirmed under thermophilic composting conditions (Test Method D 5338).

6.3 The following test methods can be used to obtain additional information regarding the inherent biodegradability or degradability of materials.

6.3.1 *Test Method D 5247 (Specific Microbe Test)*—This aqueous test method uses pure microbial cultures to assess the biodegradability of materials under mesophilic conditions, based on weight loss or molecular weight changes. The test duration is 7 to 14 days. Microbes indigenous to the composting or soil environment can be evaluated with this test method.

6.3.2 *Practice G 22 (Bacteria Growth Resistance)*—With this test, solid materials are placed in inoculated molten agar, and the extent of microbial growth is rated. The test duration is approximately 14 days. A positive result indicates that the test material is potentially biodegradable.

6.3.3 *Clear Zone Assays*—Opaque test material is dispersed into solid agar. A given quantity of microorganisms is applied to form a lawn. Degradation of a material is indicated by the formation of clear zones in the solid medium. The test duration is 3 to 14 days. A positive result indicates that the test material is potentially biodegradable. Microbes indigenous to the composting or soil environment can be evaluated with this test method. The biodegradability of nonopaque organic materials can be assessed by adding the indicator 2,3,5-triphenyl-tetrazolium chloride (TTC) to the media. If microbial colonies can oxidize the material, their electron transport pathways will reduce the TTC. Reduced TTC is detected by its deep red color, whereas oxidized TTC is colorless (2).

6.3.4 *Sealed Vessel Test (Test Method E 1720)*—Ready aerobic biodegradability of organic materials is assessed in small, sealed vessels inoculated with sewage microbes. Gaseous CO₂ is monitored by head space analysis. This test method represents a simpler approach relative to Test Method D 5209 (Sturm). A positive result (60 % +) usually indicates that the material will also biodegrade in a composting environment.

6.4 If it appears that a material is being colonized or used as a growth substrate by microorganisms, a more fundamental understanding of the degradation process can be obtained. This typically involves the preparation of purified microbial cultures capable of using the material as a carbon source. The pure cultures can then be used for the isolation and characterization of cellular enzyme systems contributing to degradation of the material (3).

6.5 The potential effect of materials on plant germination may be assessed with the cress seed test. This step may be especially valuable for screening processing additives used at 1 % or less in the plastic. Soils from the above soil contact test (6.2.2) may be evaluated at the beginning and end of the test to establish the potential effect of microbial degradation products. In the cress test, soil or compost is extracted with water and filtered. The supernatant is used for the germination test. Various dilutions of the supernatant are prepared, and aliquots are added to petri dishes lined with filter paper. Cress seeds are placed on the wet paper and left to germinate in the dark over 4 days at room temperature. The percentage of germinated seeds is determined after 4 days and compared to a water control. Soils containing test materials should not be significantly different from the blank soil at 95 % confidence interval.

7. Tier 2: Laboratory and Pilot Scale Composting Assessment

7.1 The objectives of this tier are as follows:

7.1.1 To establish the degradation rate (change in chemical structure, decrease in mechanical strength, fragmentation, or weight loss) of the polymeric material or plastic product under laboratory-scale thermophilic composting conditions.

7.1.2 To confirm the biodegradability of the plastic product and other organic components in the product under laboratory scale thermophilic composting conditions.

7.1.3 To determine whether organic residues continue to biodegrade in a laboratory-scale simulation of compost-amended soil.

7.1.4 To obtain additional evidence with regard to a plastic product's or component's environmental safety using compost obtained from laboratory-scale studies.

7.1.5 To establish the degradation rate of a plastic product or finished article under pilot scale composting conditions prior to the full-scale composting studies described in Tier 3.

7.2 The following test methods are suggested for establishing the degradation rate of polymeric materials or plastic products under laboratory-scale composting conditions.

7.2.1 The degradation rate of test materials under laboratory thermophilic composting conditions may be obtained by performing Test Method D 5338 without the CO₂ trapping component. The test materials are exposed to an inoculum that is derived from stabilized compost from municipal solid waste.

7.2.1.1 Aerobic composting occurs in an environment in which temperature, aeration, and humidity are monitored and controlled closely. The degradation rate of materials may be established with the current Test Method D 5338 temperature profile or constant 58°C, which has been adopted by the European standards organization, CEN. The test duration is 45 days, but it may be extended to simulate field conditions. At various time intervals, materials may be removed from the compost, cleaned, and dried.

7.2.1.2 Changes in material chemical structure may be quantitated based on molecular weight distribution (Test Method D 3593). More sophisticated techniques such as Fourier transform infrared (FTIR) and nuclear magnetic resonance may also be appropriate (4).

7.2.1.3 Loss of material integrity due to material degradation may be quantitated by using Test Methods D 882 for thin films or Test Method D 638 for sheet. Material degradation may also be established based on weight loss. Surface damage may be evaluated using tools such as Scanning Electron Microscopy (SEM).

7.2.1.4 Degradation rates of materials may also be established using simulated MSW matrixes in externally heated and self-heating controlled laboratory-scale composting environments in accordance with Practices D 5509 and D 5512.

7.2.1.5 Sieve analysis can be included in the above tests to obtain additional fragmentation information. Compost containing fragmented material may be passed through a U.S. Standard Sieve¹⁰ with a 3/8-in. (9.51-mm) opening. This simulates the final screening step used to produce high-quality compost products. National, state, and local regulatory requirements should also be consulted.

NOTE 6—Agitation from compost turning equipment at full-scale facilities may give faster fragmentation rates relative to laboratory-scale methods.

7.3 The following test methods are suggested for establishing the biodegradation rate of a plastic product, polymeric materials in the product, and other organic components in a composting environment.

7.3.1 Test Method D 5338 is suggested for establishing the biodegradability of organic components in a plastic product in a composting environment. Material biodegradability is based on the amount of material carbon recovered as gaseous carbon (CO₂) relative to the amount of material carbon

¹⁰ Available from W. S. Tyler Co., Cleveland, OH.

originally added to the compost. Product organic components, at levels of 1 % or less, generally do not require retesting in this step if a positive result was obtained in Tier 1 (6.2). This test can be performed separately or concurrently with (7.2). Biodegradation rates or end points should meet national, state, or local regulations or be compared to the reference materials described in 7.3.2.

7.3.1.1 If a negative result is obtained, check the controls described in the test method or repeat the test method with a lower dose closer to field-use levels (assuming that an acceptable signal:noise ratio is possible).

7.3.2 Products or components may be compared under identical conditions to natural reference materials known to be biodegradable in a composting environment (for example, cellulose or starch (see Guidelines for the Evaluation of Feedstock for Source Separated Biowaste Composting and Biogasification)). Other materials regarded as biodegradable in a composting environment are oak, maple, and corn leaves and kraft paper (5). Unmodified polyethylene film, typically used to collect yard trimmings, is generally considered a negative reference material.

7.3.3 The recovery of all material carbon as gaseous carbon (CO₂) may be impractical due to the incorporation of material carbon into microbial biomass or stable humic substances. ¹⁴Carbon labelled materials may allow carbon to be partitioned into CO₂-C, residue-C, water soluble-C, and microbial biomass-C to obtain a complete mass balance. The use of radio-labelled materials allows testing at field-use levels in composts with high background CO₂. However, these definitive studies are comparatively expensive.

NOTE 7—An ASTM standard method for ¹⁴C-labelled materials is not available.

7.3.4 The effect of a material on compost microorganisms may be evaluated as described by Schwab, et al (6).

7.4 The following test methods are suggested for establishing the rate at which plastic product organic components continue to biodegrade in compost conditioned soil.

7.4.1 If incomplete biodegradation is indicated in 7.3, the biodegradability of product or component residue in soil may be established with the soil contact method cited in 6.2.2. The test duration should be a minimum of 6 months or until a regulatory specification is attained or results support the calculation of a rate as indicated by the lack of a plateau.

7.4.2 Materials from 7.3.2 can also be evaluated in soil to obtain additional comparative data.

7.4.3 Composts should be prepared in accordance with the Bridging Practice of Practice D 5951 prior to the soil studies.

7.5 The plastic product should not cause any negative ecotoxicological effects on the resulting compost. The following terrestrial and aquatic ecotoxicity tests are suggested for obtaining evidence regarding product effects on plant and animal life. National, state, and local regulatory requirements should be considered.

NOTE 8—The test material dose specified in laboratory methods, such as Test Method D 5338, is much higher than levels expected to be released into the environment. Ecotoxicity is concentration dependent. If a negative effect is observed, additional testing is suggested based on predicted exposure levels.

7.5.1 Compost from 7.3 should be prepared in accordance

with Practice D 5152 or D 5951 prior to performing ecotoxicity tests.

7.5.2 The following ecotoxicity tests are suggested as a minimum prior to proceeding to pilot and full-scale testing:

7.5.2.1 Aquatic toxicity test with rotifer *Brachionus* in accordance with Guide E 1440. The test duration is one day.

7.5.2.2 Plant germination as described by the cress seed test in 6.5. The test duration is four days.

7.5.2.3 Plant growth test as described by OECD Guideline 208. This procedure determines phytotoxicity by mixing the compost containing the material with soil. The plant emergence survival and growth is evaluated. Three plant species are generally tested. The test duration is approximately 1 month. The results from compost containing material are compared to compost without material and a soil control.

7.5.2.4 Earthworm test in accordance with OECD Guideline 207. This procedure determines possible toxicity by mixing the compost containing the material with a specified soil. The earthworm weight change and survival are measured. The results from compost containing material are compared to compost without material and soil controls.

7.6 Pilot-scale investigations are intended to confirm the results from laboratory-scale composting tests. These tests may be used to evaluate the practical processibility, at anticipated field use levels, of a plastic product or full-sized article by simulating larger-scale operating conditions (see Guidelines for the Evaluation of Feedstock for Source Separated Biowaste Composting and Biogasification). Pilot-scale tests may also be used to establish the impact of different waste matrixes on the degradation of a material (6).

7.6.1 A standard ASTM pilot-scale test method has not been developed. Pilot-scale systems ranging from relatively simple to complex have been constructed by industry (6) and commercial testing laboratories. Some systems include rotating drums (manual or mechanical) to simulate full-scale feedstock homogenization and composting process initiation. Some systems control feedstock aeration and temperature. Vessel sizes range from 30 to 200 L. All systems are self-heating. The duration of the thermophilic composting phase ranges from a few days to a few weeks.

7.6.2 Externally heated pilot-scale systems may be required to simulate thermophilic conditions characteristic of full-scale processes.

7.6.3 Product degradation, safety, and microflora changes may be measured with the techniques described in 7.2, 7.3.4, and 7.5.

7.7 In addition to ecotoxicity, a product may not have a negative effect on the quality of the compost based on standard chemical and physical tests. National, state, and local regulation should be consulted.

7.7.1 The quality of pilot-scale composts containing degraded plastic should be compared to pilot-scale plastic-free composts based on chemical analysis. Suggested analyses include Environmental Protection Agency (EPA) 503 heavy metals, pH, compost maturity, density, porosity, and conductivity as described in Refs (1, 7).

8. Tier 3: Field/Full-Scale Assessment

8.1 In this tier, the compostability of products in the field is established based on full-scale composting studies and backyard composting environments. The backyard studies

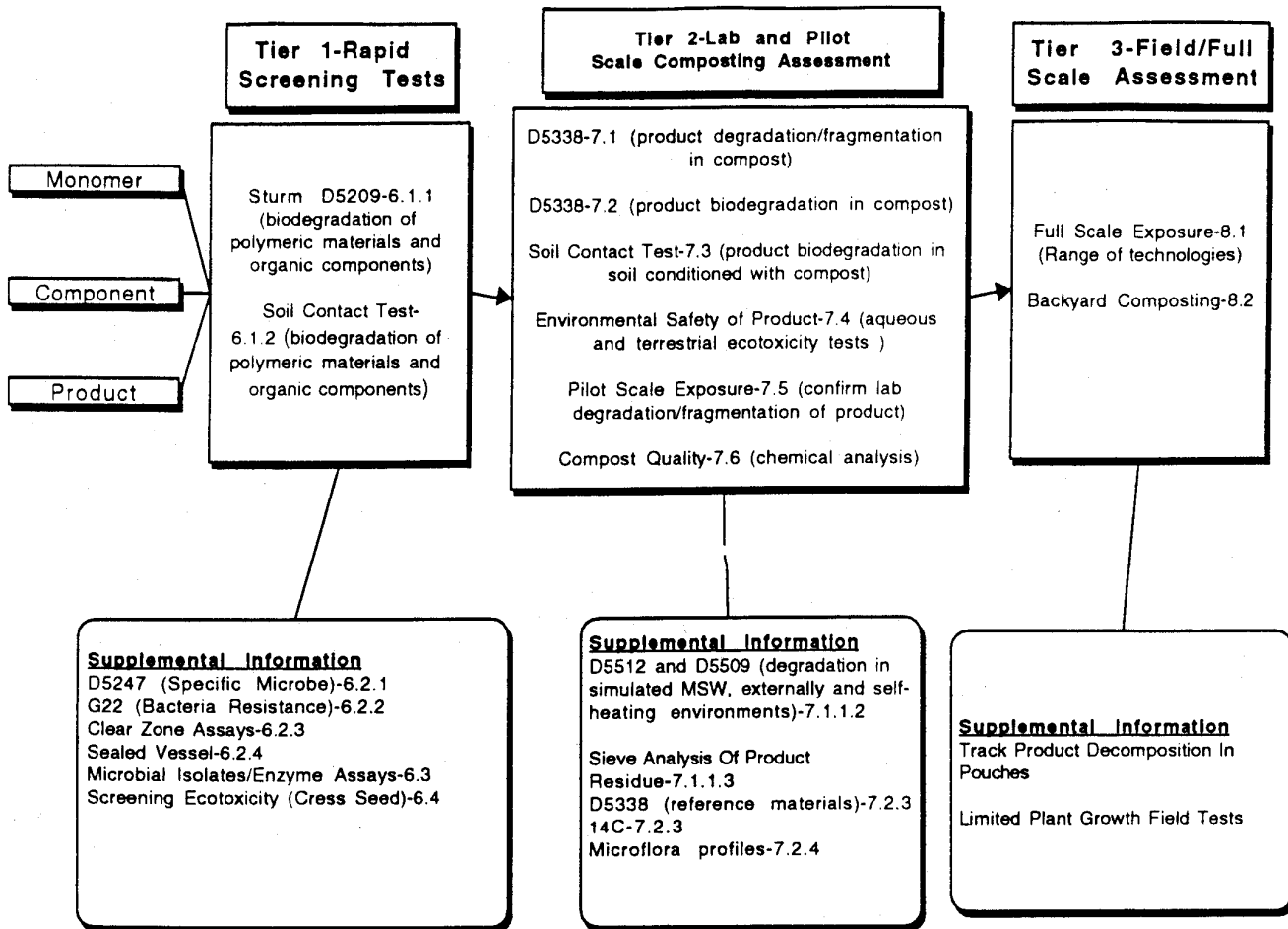


FIG. 1 Flow-Chart of Guide D 6002

have been included in response to current Federal Trade Commission (FTC) marketing guidelines (8).

8.2 The field assessment of products in full-scale systems should include a range of technologies. Technologies range from unmanaged piles (municipal yard waste) to turned aerated static piles with temperature control to tunnel/agitated bay systems with temperature control. Consult Ref (9) to obtain descriptions of facility technologies in the United States. The need for full-scale assessment may be reduced as composters, solid waste managers, and degradable plastic product suppliers gain experience with their products.

8.2.1 Ideally, product should be added to the feedstock at anticipated exposure levels and be exposed to the entire process to establish the compatibility with turning equipment and to ensure that the product is not screened off early in the process. Other goals are to ensure that the product does not have an adverse effect on the process (that is, biological activities, litter, odor, pH, etc.) and that the product is not visually distinguishable after curing and final processing is completed.

8.2.2 A useful technique for quantitating the degradation rate in full-scale systems that do not grind feedstock is the

placement of fiberglass pouches containing the product in the feedstock. The pouches may be removed periodically to measure the fragmentation rate and quantify product degradation as described in 7.2.

8.2.2.1 A full-scale procedure that includes use of the pouches has been developed by the ASTM Institute for Standard Research Degradable Polymer Advisory Committee. The procedure may be submitted to ASTM for standardization.

8.2.3 Limited plant growth studies are also suggested using compost containing degradable products. The intent of these studies is to confirm previous laboratory/pilot-scale results.

8.3 According to the FTC marketing guidelines (8), an unqualified compostable claim is considered deceptive if the product is not compostable in a "home" or "backyard" environment.

8.3.1 The compostability of products in backyard composting environments can be established if desired. The composting process tends to be slower due to a relatively short thermophilic composting phase. Loss of heat due to the relatively small pile or bin size is a significant factor. The approach described in 7.6 and 7.7 will probably provide sufficient evidence.

8.3.2 The compostability of products should be established in both bins and freestanding piles based on typical home composting practices.

NOTE 9—Guidelines for best management practices under backyard composting environments can be obtained from the Composting Council (1).

9. Report

9.1 The report should summarize the results from all

three tiers. The report should contain a conclusion regarding the compostability (fragmentation, biodegradation, and safety) of the product based on the “weight of evidence.”

10. Keywords

10.1 biodegradation; compostable; composting; degradable; plastic; polymer; strategy; toxicity

REFERENCES

(1) *Compost Facility Operating Guide*, Composting Council, Alexandria, VA, 1995.

(2) Skipper, H. D., et al, “Microbial Degradation of Herbicides,” *Research Methods in Weed Science*, 1989, pp. 457-462.

(3) Jendrossek, D., et al, “Degradation of Poly(3-hydroxybutyrate), PHB, by Bacteria and Purification of a Novel PHB Depolymerase from *Comamonas* sp.,” *Journal of Environmental Polymer Degradation*, Vol 1, 1993, pp. 53-63.

(4) Seal, K. J., “Test Methods and Standards for Biodegradable Plastics,” *Chemistry and Technology of Biodegradable Polymers*, G. L. Griffin, ed., Blackie Academic and Professional, Bishopbriggs, Glasgow, 1994, pp. 116-134.

(5) “Toward Common Ground,” *Proceedings of the International Workshop on Biodegradability*, Institute for Local Self-Reliance, Washington, DC, 1992.

(6) Schwab, et al, “Characterization of Compost from a Pilot Plant-Scale Composter Utilizing Simulated Solid Waste,” *Waste Management and Research*, Vol 12, 1994, pp. 289-303.

(7) *Recommended Test Methods for the Examination of Compost and Composting*, Composting Council, Alexandria, VA, 1993.

(8) *Guidelines for the Use of Environmental Marketing Claims*, Federal Trade Commission, Washington, DC, 1992.

(9) *U.S. Solid Waste Composting Facility Profiles*, Vol II, National Composting Program, United Conference of Mayors, Washington, DC, 1993.

(10) Zucconi, et al, “Cress Seed Germination Bioassay,” *Bicycle*, March/April 1981.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.



Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions¹

This standard is issued under the fixed designation D 5338; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method determines the degree and rate of aerobic biodegradation of plastic materials on exposure to a controlled-composting environment under laboratory conditions. This test method is designed to yield reproducible and repeatable test results under controlled conditions that resemble composting conditions. The test substances are exposed to an inoculum that is derived from compost from municipal solid waste. The aerobic composting takes place in an environment where temperature, aeration and humidity are closely monitored and controlled.

1.2 This test method is designed to yield a percentage of conversion of carbon in the sample to carbon dioxide. The rate of biodegradation is monitored as well.

1.3 This test method is designed to be applicable to all plastic materials that are not inhibitory to the microorganisms present in aerobic composting piles.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* Specific hazard statements are given in Section 8.

1.6 This test method is equivalent to ISO 14852.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 618 Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing²

D 883 Terminology Relating to Plastics²

D 1293 Test Methods for pH of Water³

D 1888 Test Methods for Particulate and Dissolved Matter, Solids, or Residue in Water⁴

D 2908 Practice for Measuring Volatile Organic Matter in

Water by Aqueous-Injection Chromatography⁵

D 3590 Test Methods for Total Kjeldahl Nitrogen in Water³

D 4129 Test Method for Total and Organic Carbon in Water by High-Temperature Oxidation and Coulometric Detection⁶

E 260 Practice for Packed Column Gas Chromatography⁷

E 355 Practice for Gas Chromatography Terms and Relationships⁷

2.2 APHA—AWWA—WPCF Standards:

2540 D Total Suspended Solids Dried at 103 to 105°C⁸

2540 E Fixed and Volatile Solids Ignited at 550°C⁸

2.3 ISO Standard:

ISO 14852 Plastics—Evaluation of the Ultimate Aerobic Biodegradability and Disintegration Under Controlled Composting Conditions—Method by Analysis of Released Carbon Dioxide⁹

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions of terms applying to this test method appear in Terminology D 883.

4. Summary of Test Method

4.1 This test method consists of the following:

4.1.1 Selection of plastic material for the determination of the aerobic biodegradability in a controlled-composting system,

4.1.2 Obtaining an inoculum from composted municipal solid waste,

4.1.3 Exposing the test substances to a controlled aerobic composting process in conjunction with the inoculum,

4.1.4 Measuring carbon dioxide evolved as a function of time, and

4.1.5 Assessing the degree of biodegradability.

4.2 The percentage of biodegradability is obtained by determining the percentage of carbon in the test substance that is converted to CO₂ during the duration of the test. This percentage of biodegradability will not include the amount of carbon converted from the test substance that is converted to cell

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.96 on Environmentally Degradable Plastics.

Current edition approved July 10, 1998. Published September 1998. Originally published as D 5338 – 92.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

³ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

⁴ Discontinued; see 1991 *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

⁵ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.02.

⁶ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.04.

⁷ *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

⁸ *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17th Edition, 1989, American Public Health Association, 1740 Broadway, New York, NY 19919.

⁹ Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

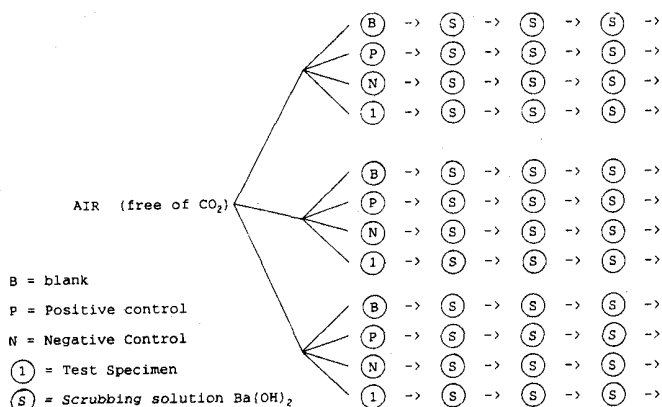


FIG. 1 Set-Up Using Carbon Dioxide-Trapping Apparatus

biomass and that is not, in turn, metabolized to CO₂ during the course of the test.

4.3 The disintegration of a compact test material is visually determined at the end of the test. Additionally, the weight loss of the test material may be determined.

5. Significance and Use

5.1 Biodegradation of a plastic within a composting unit is an important phenomenon because it will affect the decomposition of other materials enclosed by the plastic and the resulting quality and appearance of the composted material. Biodegradation of plastics will also allow the safe disposal of these plastics through solid-waste composting plants. This procedure has been developed to permit the determination of the rate and degree of aerobic biodegradability of plastic products when placed in a controlled composting process.

5.2 *Limitations*—Because there is a wide variation in the construction and operation of composting systems and because regulatory requirements for composting systems vary, this procedure is not intended to simulate the environment of any particular composting system. However, it is expected to resemble the environment of a composting process operated under optimum conditions. More specifically, the procedure is intended to create a standard laboratory environment that will permit a rapid and reproducible determination of the aerobic biodegradability under controlled composting conditions.

6. Apparatus

6.1 Composting Apparatus (see Fig. 1):

6.1.1 A series of at least twelve composting vessels (one test substance, one blank, one positive and one negative control, all in three replicates) of 2 to 5 L of volume. For screening purposes, depending upon the test material, a smaller volume also may be used.

6.1.2 *Water Baths*, or other temperature controlling means capable of maintaining the temperature of the composting vessels at 58°C (±2°C).

6.1.3 *Pressurized-Air System*, that provides CO₂-free, H₂O-saturated air to each of the composting vessels at accurate aeration rates. If using a direct measurement of CO₂ (6.4), then normal air may be used.

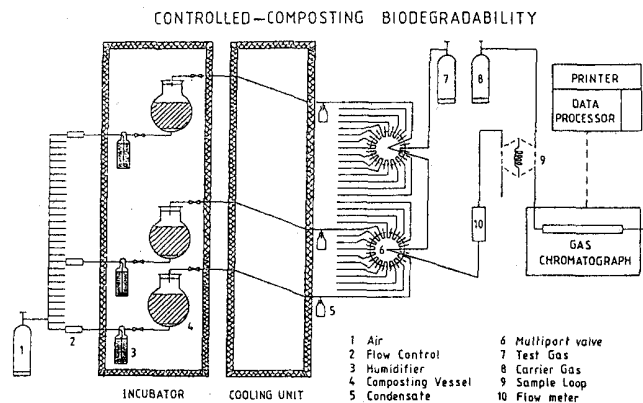


FIG. 2 Optional Set-Up Using a Gas Chromatograph

6.1.4 Suitable devices for measuring oxygen and CO₂ concentrations in the exhaust air of the composting vessels, such as specific sensors or appropriate gas chromatographs.

6.2 Carbon Dioxide-Trapping Apparatus for Each Composting Vessel:

6.2.1 At least three 5000-mL bottles fitted with gas sparging and containing Ba(OH)₂ carbon-dioxide scrubbing solution.

6.2.2 *Flexible Tubing*, nonpermeable to carbon dioxide.

6.2.3 *Stoppers*, equipped with gas-sampling parts.

6.3 Miscellaneous:

6.3.1 *Analytical Balance*, (±0.1 mg) to weigh test specimen.

6.3.2 *100-mL Burette*.

6.3.3 *0.05 N HCl*.

6.3.4 *pH Meter*.

6.3.5 Suitable devices and analytical equipment for measuring dry solids (at 105°C), volatile solids (at 550°C), volatile fatty acids by aqueous-injection chromatography, total Kjeldahl nitrogen and carbon concentrations.

6.4 *Optional*—The carbon dioxide-trapping apparatus and titration equipment can be replaced by a gas flow meter plus a gas-chromatograph, or other apparatus equipped with suitable detector and column(s), for measuring CO₂ and O₂ concentrations in the exhaust air of each vessel. Take care to analyze CO₂ concentration on a sufficiently frequent basis in order to produce a reliable cumulative CO₂ production over the course of the test (for example, every 3 to 6 h). A standard gas should be injected to internally standardize the gas-chromatograph on a continuous basis over the course of the test. Operate the gas chromatograph in conformance with Practices E 260 and E 355 (see Fig. 2).

6.5 Ensure that all glassware is cleaned thoroughly and free from organic matter.

7. Reagents and Materials

7.1 *Barium Hydroxide Solution*, approximately 0.024 N and then standardized, prepared by dissolving 4.0 g Ba(OH)₂ per litre of distilled water. Filter through filter paper and store sealed as a clear solution to prevent absorption of CO₂ from the air.

7.2 *Analytical-Grade Cellulose*, for thin-layer chromatography with a particle size of less than 20 μm as positive control.¹⁰

7.3 *Polyethylene*, as a negative control. It should be in the same form as the form in which the sample is tested (polyethylene film for film samples, polyethylene pellets in case sample is in the form of pellets, etc.).

8. Hazards

8.1 This test method requires the use of hazardous chemicals. Avoid contact with the chemicals and follow manufacturer's instructions and Material Safety Data Sheets.

8.2 The compost inoculum may contain sharp objects. Take care when handling it.

8.3 The composting vessels are not designed to withstand high pressures. The system should be operated at close to ambient pressure.

9. Compost Inoculum

9.1 The compost inoculum should be two to four months old well-aerated compost coming from the organic fraction of municipal solid waste and sieved on a screen of <10 mm. If such a compost is not available, compost from plants, treating green, or yard waste, or mixtures of green waste and municipal solid waste may be used. It is recommended that the compost inoculum produces between 50 and 150 mg of CO_2 per gram of volatile solids over the first ten days of the test, and has an ash content of less than 70 % and a pH between 7 and 8.2. Total dry solids should be between 50 and 55 %.

9.2 The compost inoculum should be as free from larger inert materials (glass, stones, metals, etc.) as possible. These items should be removed manually as much as possible to produce a homogeneous compost inoculum.

9.3 It is recommended to use compost of sufficient porosity to enable conditions to be as aerobic as possible. Addition of structural material, such as small wood particles, or persistent or poorly biodegradable inert material may prevent the compost from sticking.

10. Test Specimens

10.1 The test specimen should have sufficient carbon to yield carbon dioxide that can be adequately measured by the trapping apparatus or CO_2 measurements.

10.2 All basic composting parameters, such as C/N, oxygen in the composting vessel, porosity, and moisture content should be optimized so as to make a good composting process possible. The C/N ratio should preferably be between 10 and 40 for both the inoculum and test substance combined. Oxygen levels in the composting vessel should be at least 6 % at all times and no free-standing water nor clumps of material should be present.

10.3 Test specimens may be in the form of films, formed articles, dog bones, granules, powder, or other, and conform to Practice D 618.

11. Procedure

11.1 Preparation of the Samples:

11.1.1 Obtain an inoculum from a properly operating aerobic composting plant treating municipal solid waste, or the organic fraction thereof. If required, further stabilize the inoculum at the laboratory in order to obtain a low CO_2 production (see 9.1.).

11.1.1.1 Screen the inoculum to less than 10 mm and manually remove and discard any large inert items (pieces of glass, stone, wood, etc.). Determine volatile solids, dry solids and nitrogen content according to Test Methods D 3590, D 1888, and APHA Test Methods 2540 D and 2540 E.

11.1.2 Determine volatile solids, dry solids and carbon content of all the test substances according to APHA Test Methods 2540 D and 2540 E and Test Method D 4129.

11.1.3 Weigh out roughly 600 g of dry solids of inoculum and mix with about 100 g of dry solids coming from the sample. Adjust the dry solids content of the mixture in the vessel to approximately 50 % with distilled water. Add ammonium chloride if the C/N ratio is more than 40. Weigh vessels with all of the contents immediately before initiation of the composting process.

11.1.4 The blank consists of the inoculum only, containing about 600 g of dry solids. As references, use thin-layer chromatography cellulose as a positive control and polyethylene as a negative control.

11.2 *Start-Up Procedure*—Initiate aeration of the composting vessels with air-flow rates that are sufficiently high to ensure that oxygen levels do not drop below 6 % in the exhaust air. Oxygen levels should be closely controlled during the first week and measured at least twice daily. Adjust air-flow rates as needed.

11.3 Operating Procedure:

11.3.1 The composting vessels are incubated in the dark for a period of 45 days. Initially, keep the incubation temperature at 35°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) for a period of one day to simulate a mesophilic start-up phase. Subsequently, raise the temperature to 58°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) for a period of four days. After this sanitizing period, reduce the temperature to 50°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) for optimum composting conditions and maintain until day 28. Reduce the temperature then to 35°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) for the remainder of the test period to simulate a mesophilic curing phase. The incubation time of 45 days may be extended until no significant CO_2 production in excess of the inoculum is recorded for a period of one week.

11.3.2 Check CO_2 and O_2 concentrations in the outgoing air at least daily with a minimum time interval of 6 h after the first week for the remainder of the test.

11.3.3 Check air flow daily before the composting vessels and at the outlets, ensuring that no leaks are present in the complete system. Adjust air flow to maintain a CO_2 concentration of at least 2 % volume over volume to allow accurate determination of CO_2 level in the exhaust air.

11.3.4 Ensure proper composting conditions. Shake the composting vessels weekly to prevent extensive channelling, provide uniform attack on the test specimen and provide an even distribution of moisture. In case excessive moisture levels are observed, such as free-standing water in the vessels or clumping due to high moisture content, remove excess liquid by injecting dry air, or by drainage via air inlet. If excessively

¹⁰ For development of this test method, Avicel, available from EM Chemicals, Inc., Hawthorne, New York, was used.

dry conditions are observed, that will severely slow down the breakdown process, add moisture. During the whole course of the test, make adjustments to ensure proper composting conditions. If adjustments are made, then CO₂ and O₂ concentrations must be monitored closely during the following 72 h and measured at least twice daily with a time interval of more than 6 h.

11.4 End of the Test:

11.4.1 At the end of the test, weigh the vessels with the contents and determine the dry solids concentration remaining in the composted material.

11.4.2 Measure the pH in conformance with Test Methods D 1293. If the pH is less than 7, measure the volatile fatty acids spectrum to indicate souring of the contents in the composting vessel in accordance with Practice D 2908. Measure the pH by diluting the sample on a 5:1 w/w ratio of distilled water to compost inoculum or residue, mix by shaking manually and measure immediately.

11.4.3 If more than 2 g of volatile fatty acids per kilogram of dry matter in the composting vessel is formed, the test must be regarded as invalid.

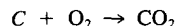
12. Calculation

12.1 Determine the total carbon content of the test material by elemental analysis or by calculation if the chemical composition is well established. This allows the theoretical quantity of carbon dioxide evolution to be calculated as follows:

$$\text{material} = w \% \text{ carbon}$$

$$w/100 \times \text{g of material charged} = Y \text{ g carbon charged to}$$

$$\text{compost vessel} = C_i$$



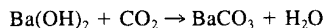
$$12 \text{ g C yields } 44 \text{ g CO}_2$$

$$Y \text{ g C yields } \frac{44 \times Y}{12} \text{ g CO}_2$$

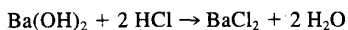
12.2 Determine the cumulative CO₂ production (in grams) from the test substances.

12.2.1 Determine the amount of CO₂ produced by the difference, in millilitres of titrant, between the test substance and blank Ba(OH)₂ traps. Perform the titration with 0.05 N HCl.

12.2.1.1 When CO₂ enters the absorber bottles, it reacts in the following manner:



12.2.1.2 The BaCO₃ formed is insoluble and precipitates. Determine the amount of Ba(OH)₂ remaining in solution by end-point titration with HCl using phenolphthalein as an indicator according to the following equation:



12.2.1.3 From the above two equations, it can be seen that the number of mmol of CO₂ produced is:

$$\text{mmoles of CO}_2 = \text{mmoles of Ba(OH)}_2 \text{ at start} - \frac{\text{mmoles HCl}}{2}$$

12.2.2 For the option with gas chromatography, the cumulative CO₂ production (in grams) is determined from the

measurements of flow rate and gas composition and after recalculation to STP (standard temperature and pressure) conditions.

12.2.3 Calculate the amount of cumulative gaseous-carbon produced by each reactor.

12.2.4 Determine the mean (of the three replicates) net gaseous-carbon production by controlled composting of the test substances by subtracting the mean gaseous carbon production of the control (three replicates) containing only the inoculum.

12.3 Calculate the percent of biodegradation by dividing the average net gaseous-carbon production of the test compound by the original average amount of carbon in the test compound and multiplying by 100:

$$\% \text{ biodegradation} = \frac{\text{mean } C_g(\text{test}) - \text{mean } C_g(\text{blank})}{C_i} \times 100$$

where:

C_g = amount of gaseous-carbon produced, g, and

C_i = amount of carbon in test compound added, g.

12.4 Calculate the standard error, s_e, of the percentage of biodegradation as follows:

$$s_e = \text{SQRT}((s_{\text{test}}^2/n1) + (s_{\text{blank}}^2/n2)) \times 100/C_i$$

n1 and n2 are the number of replicate test and control digesters respectively; s is the standard deviation of the total gaseous carbon produced.

12.5 Calculate the 95 % confidence limits as follows:

$$95 \% \text{ CL} = \% \text{ biodegradation} \pm (t \times s_e)$$

Where t is the t-distribution value for 95 % probability with (n1 + n2 - 2) degrees of freedom; thus n = 3 + 3 - 2 = 4.

13. Interpretation of Results

13.1 Information on the toxicity of the plastic material may be useful in the interpretation of inhibitive effects.

13.2 In most instances when investigating a plastic material, a reference or control substance known to biodegrade is necessary in order to check the activity of the inoculum. If sufficient biodegradation (a minimum of 70 % for cellulose within 45 days) is not observed with the positive reference, the test must be regarded as invalid and should be repeated, using new inoculum.

14. Report

14.1 Report the following data and information:

14.1.1 Information on the inoculum, including source, percent dry solids, percent volatile solids, total Kjeldahl nitrogen,

TABLE 1 Results from Within-Laboratory Testing for the Aerobic Biodegradability of Cellulose as a Positive Control Under Controlled Composting Conditions

	Biodegradability after 45 days, %	Standard Deviation, %	95 % Confidence Limit, %
Run 1	76.7	4.9	8.2
Run 2	70.3	2.4	4.8
Run 3	78.9	0.3	2.0
Mean of Three Runs	75.3	2.5	5.0

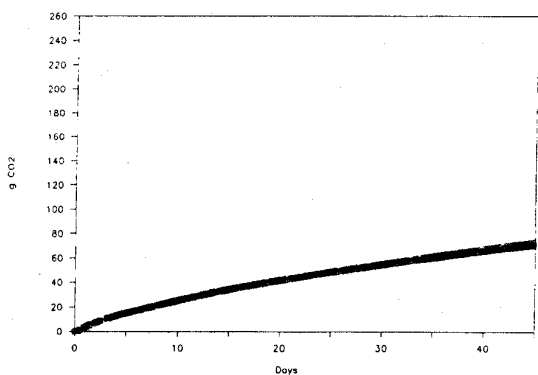


FIG. 3 Cumulative CO₂ Production from Inoculum

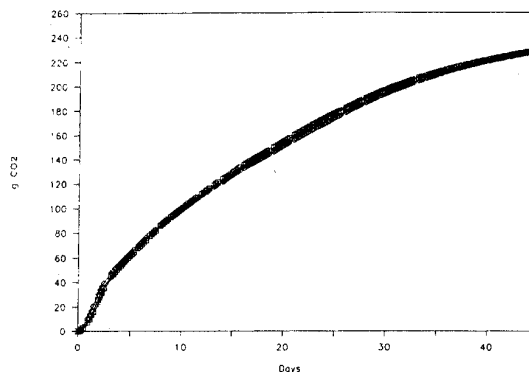


FIG. 4 Cumulative CO₂ Production from Inoculum Plus Cellulose

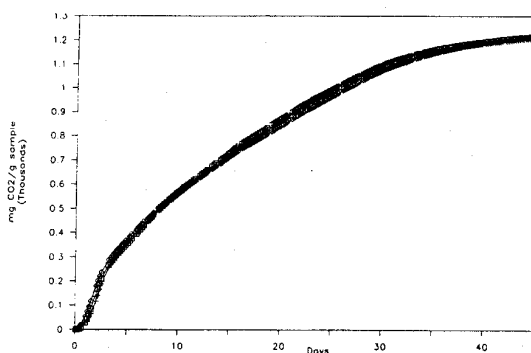


FIG. 5 Net Cumulative CO₂ Production from Cellulose

activity (CO₂ production in the first ten days), date of collection, storage, and handling.

14.1.2 Carbon content of the plastic materials, positive and negative control, and calculation of the theoretical maximum carbon dioxide production. Report specific information on the size, shape, volume, and thickness of the plastic materials tested, along with the form of the plastic material, that is, sheet, powder, pellet, etc.,

14.1.3 Weight of vessels with contents before and at the end of the test,

14.1.4 Cumulative carbon dioxide evolution and oxygen consumption over time and display graphically. Report apparatus used for carrying out the test method,

14.1.5 Percentage of aerobic biodegradation for each plastic material tested, the standard deviation and 95 % confidence interval for each material or control substance tested for the percent of biodegradation,

14.1.6 Percentage of biodegradation relative to the positive reference (cellulose = 100 %),

14.1.7 Temperature range of test, and

14.1.8 pH of compost inoculum and pH of final residues. Volatile fatty acids concentration for vessels with a final pH of less than 7.

15. Precision and Bias

15.1 The precision and bias of the procedure in this test method is being determined.

15.2 Preliminary results for within-laboratory repeatability testing using a controlled composting set-up with gas chromatograph are presented in Table 1. These data represent three different determinations of the degradation of cellulose as a positive reference. The average degradation of cellulose after 45 days of composting at a constant temperature of 50°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) was 75.3 %, with an average standard deviation of 2.5 % and an average 95 % confidence limit interval of 5 %. All three runs were carried out within a seven-month period by the same operators. Figures 3, 4, and 5 represent a graphical view of the third run in which a biodegradability of 78.9 % was obtained as the mean for the three replicates containing cellulose as the positive control, with a standard deviation of 0.3 % and a 95 % confidence limit interval of 2 %. The graphs represent the results from three replicates for the inoculum only as the blanks (see Fig. 3), the cellulose as the positive control (see Fig. 4) and the net CO₂ production per gram of cellulose added (see Fig. 5).

16. Keywords

16.1 aerobic biodegradation; biodegradation; composting; plastics

 **D 5338**

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

Standard Test Methods for Determining Aerobic Biodegradation of Radiolabeled Plastic Materials in an Aqueous or Compost Environment¹

This standard is issued under the fixed designation D 6340; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 These test methods directly determine the rate and degree of biological oxidation of carbon in plastic materials when placed in a composting environment containing simulated municipal solid waste or an aqueous environment under laboratory conditions.

1.2 Test Method A utilizes a mixed culture derived from the target environment (waste water, sewage sludge, compost eluant, and other environmental sources). Temperature, mixing, and aeration are monitored and controlled.

1.2.1 This method has the sensitivity to determine biodegradation at concentrations commonly found in these environments.

1.3 Test Method B starts with fresh compost and proceeds through the normal composting process to an early mature stage. Temperature, aeration; and moisture are monitored and controlled.

1.3.1 This method can determine biodegradation at levels of the plastic commonly expected in municipal solid waste.

1.4 These test methods require that the target component of the plastic material be synthesized using the radioactive isotope carbon-14. Depending upon the objective, either a portion of the components of the plastic or all of the carbon can be uniformly labeled with carbon-14. The test method will determine how that labeled portion will be metabolized and biologically oxidized by the microorganisms in the system tested.

1.5 These test methods can be applied to any carbon-14 labeled compound as well as for plastic materials that have been formulated to biodegrade in a natural aerobic environment.

1.6 The synthesis and preparation of the radiolabeled plastic is beyond the scope of these methods. Carbon-14 labeled polymers may be purchased from a number of commercial labs.

1.7 There are no ISO test methods that are equivalent to the test methods in this standard.

1.8 The safety problems associated with compost and radioactivity are not addressed in this standard. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices. It is also incumbent on the user to

conform to all the regulatory requirements, specifically those that relate to the use of open radioactive sources.

1.9 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 883 Terminology Relating to Plastics²

D 5209 Test Method for Determining the Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in the Presence of Municipal Sewage Sludge³

D 5296 Test Method for Molecular Weight Averages and Molecular Weight Distribution of Polystyrene by High Performance Size Exclusion Chromatography³

D 5338 Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions³

D 5512 Practice for Exposing Plastics to Simulated Compost Environment Using an Externally Heated Reactor³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in these test methods as they relate to composting, see Terminology D 883.

3.1.1 *specific activity, SA, n*—refers to the quantity of radioactivity per mass unit of compound (polymer, etc.), that is *dpmh%*.

3.2 Acronyms:

3.2.1 *Bq, n*—becquerel; SI unit where 1 curie (Ci) = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq.

3.2.2 *dpm, n*—disintegrations per minute, used to measure the quantity of radioactivity.

3.2.2.1 *Discussion*—The measure dpm is derived from counts per minute (cpm) where $dpm = cpm - bkgd / \text{counting efficiency}$. There are $2.2 \cdot 10^6$ dpm/ μ Ci.

3.2.3 *mCi, n*—millicurie; 1/1000th of a curie (standard unit).

3.2.4 *μ Ci, n*—microcurie; 1/1000th of a millicurie.

3.2.5 *MSW, n*—municipal solid waste (organic matter).

¹ These test methods are under the jurisdiction of Committee D20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.96 on Degradable Plastics. Current edition approved Nov. 10, 1998. Published February 1999.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

4. Summary of Test Method

4.1 Test Method A involves the characterization of the test material, the preparation of the natural mixed culture inoculum, the control of the culture environment, the collection and measurement of radioactive carbon dioxide (CO₂) over time, and the calculation and interpretation of the results. The results may be compared to those obtained from Test Method D 5209.

4.2 Test Method B involves the characterization of the test material, the preparation of the compost matrix, the control of the composting process, the collection and measurement of radioactive CO₂ over time, and the calculation and interpretation of the results. The results may be compared to those obtained from Practice D 5512 as well as Test Method D 5338.

5. Significance and Use

5.1 These test methods can provide direct and unequivocal evidence of aerobic biodegradability. This requires that the radiochemical purity of the plastic is verified using Test Method D 5296.

5.2 These methods also provide the opportunity to determine the rate of biological oxidation in a complete composting environment or aqueous environment by frequent periodic sampling of carbon dioxide.

5.3 These methods provide biodegradation data at use levels of the plastic in a full cycle composting process or an aqueous system.

6. Apparatus

6.1 Liquid Culture Apparatus:

6.1.1 Fig. 1 is a diagrammatic representation of a single unit for measuring the carbon-14 carbon dioxide (CO₂) production from the biodegradation of a labeled polymer in aqueous culture. It consists of a fine needle valve for the sensitive control of oxygen flow, a water and culture flask in a controlled temperature environment, a trap to remove water from the gas stream and to insure the carbon monoxide (CO) stays in the gas phase, and a CO₂ absorption column: Periodic CO₂ production

over a chosen period of time can be sampled by collecting the CO₂ absorbent from the column at the end of each period by hand, or by automating the CO₂ collection.

6.1.2 Fig. 2 illustrates an eight-unit system with a semi-automated CO₂ collection system based on a timed, automated six-way valve. The gas effluent from the culture flask and acid trap is continuously passed through an absorption column and periodically switched to the next column. Just before the sixth column is due to switch, the five columns are drained and refilled. Soon after the sixth column switches, it is drained and refilled.

6.1.3 Fig. 3 represents a single unit from a fully automated CO₂ collection system where two absorption columns are alternately used to capture the CO₂. While one column is collecting CO₂ from the effluent, the other is drained into a scintillation vial, scintillation cocktail is added to the vial, and the column is refilled with the CO₂ absorbent automatically.

6.1.4 Fig. 4 is a diagrammatic representation of a sixteen-unit, fully automated system. The system is controlled by a personal computer and an I/O microprocessor. Valves and metering pumps are powered by electronically-controlled power supplies and relays. Reservoirs of CO₂ absorbent and scintillation cocktail serve all sixteen units. The scintillation vials are in a rack that positions the vials for each sampling period.

6.1.5 Alternative apparatus can be used if it has the capability of maintaining the appropriate temperature, controlling the oxygen flow, humidification of gas flow, and complete collection of CO₂.

6.1.6 Alternate apparatus can be manually operated or controlled by computer interface.

6.2 Composting Apparatus:

6.2.1 Fig. 5 is a diagrammatic representation of the radiochemical composting apparatus. The radiochemical composting apparatus consists of a glass composting vessel capped by an inert plastic surface, a controlled humidified air flow, a

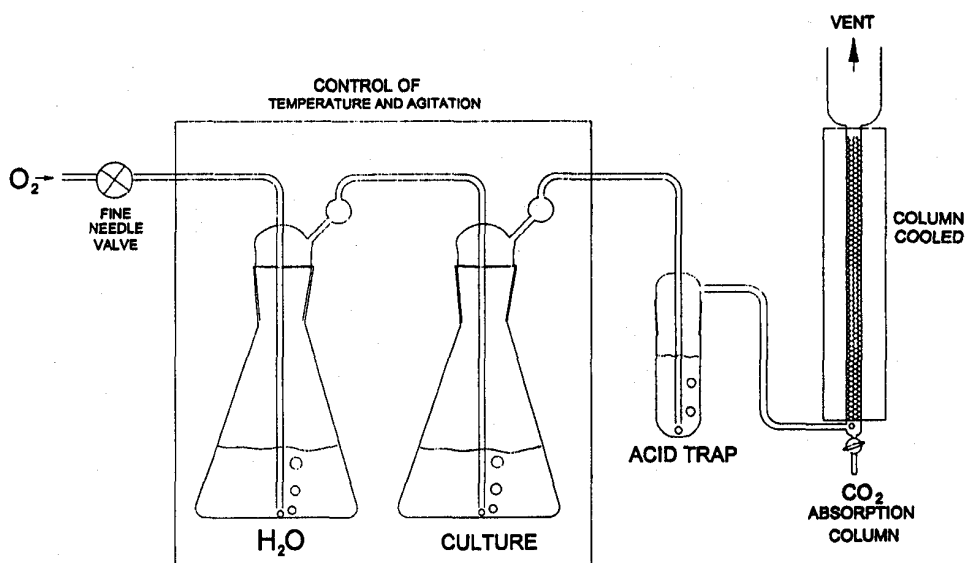


FIG. 1 Single Unit for Measuring ¹⁴C CO₂ Production from the Biodegradation of a ¹⁴C-Labeled Polymer

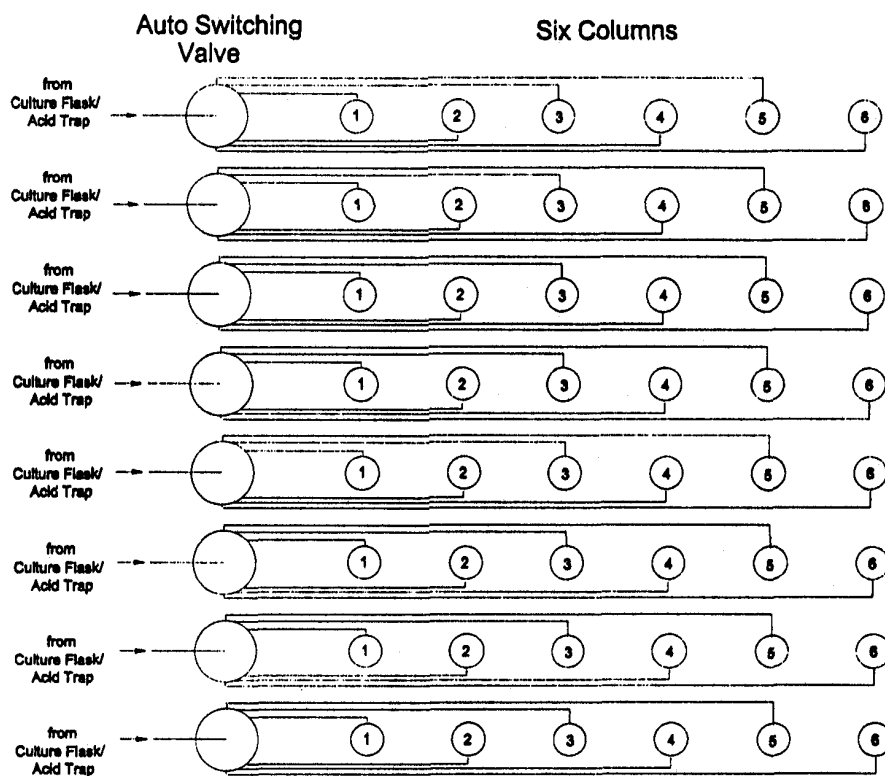


FIG. 2 Semiautomated ¹⁴C CO₂ Collection System for Eight Units Over Six Sampling Periods

controlled temperature chamber, a sulfuric acid trap, and a CO₂ absorption column.

6.2.2 The composting vessel is a 1-L borosilicate glass reaction kettle with a glass flange tooled to receive an "O" ring, clamped against an inert plastic surface. Pressurized air, controlled by a needle valve, is passed through a flow meter and then either through a water trap, maintained at the same temperature as the compost, or directly to the compost (25 ± 3 cc/min). The composting vessel is fitted with a central hollow stainless steel shaft that protrudes through a perforated distributor plate at the bottom of the vessel (Fig. 5). The air is passed down the shaft to the space below the distributor plate and then passes up through the compost to the top of the compost where it exits from the vessel. The shaft contains rods projecting perpendicular from the shaft in a radiating fashion. The shaft is connected to a motor that turns the shaft at rate of about 6 r/min. The mixing motion is designed to mix, break up clumps and convey the compost upward. The resultant action tends to circulate the compost in the composting vessel and maintains an even flow of air through the compost.

6.2.3 As air exits the composting vessel, it passes through a check valve and then proceeds through a sulfuric acid trap. The trap dehydrates the air and insures that the CO₂ stays in the gas phase.

6.2.4 The air then passes into a glass column filled with glass helixes and a commercial CO₂ absorber, methoxyethyl amine. The glass helixes break up the gas bubbles and provide greater surface area for the absorption (scrubbing) of CO₂.

6.2.5 The column is jacketed (has an outer glass chamber) where a refrigerant (propylene glycol) is circulated.

6.2.6 A liquid scintillation counter, capable of counting the low-energy beta emitted by the radioactive isotope carbon-14 is used to measure the quantity of radioactivity in the trapped CO₂. An instrument that can automatically measure counting efficiency and correct for quenching is preferred.

6.2.7 It is important to test the system for leaks and insure that the radioactive CO₂ does not escape from the apparatus both for accurate results and safety of personnel.

6.2.8 Vent columns to a radiochemical hood.

6.2.9 Place check valves, that will allow the air flow to travel in only one direction, between the test flasks and the acid and between the acid and absorber.

6.3 *Alternate Composting Apparatus:*

6.3.1 Alternative compost apparatus can be used if it conforms to the following requirements:

6.3.1.1 Although compost vessels can be larger than 1-L, it is generally not practical to exceed 1-L, due to the large volume of CO₂ that is produced and must be completely absorbed.

6.3.1.2 The compost temperature must be controlled.

6.3.1.3 The air supply flow must be controlled and humidified.

6.3.1.4 The air must be stripped of moisture prior to scrubbing to eliminate the two phases that occur when the scintillation cocktail is added to CO₂ absorber that has accumulated too much water.

6.3.1.5 The scrubbing column must be designed to permit enough air/liquid contact to completely capture the CO₂.

6.3.1.6 The efficiency of the absorption column must be verified. This can be accomplished by placing another column

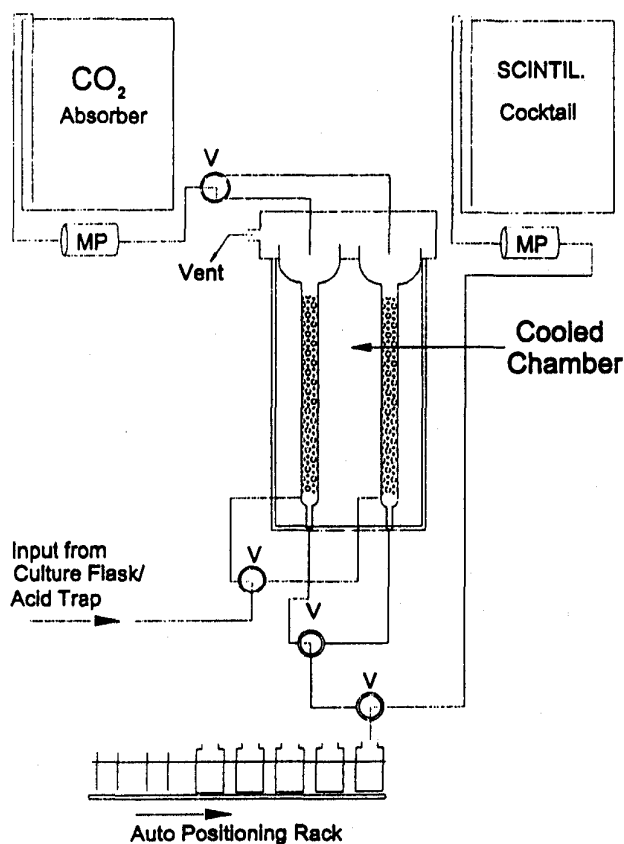


FIG. 3 Single Unit from an Automated ¹⁴C CO₂ Collection System (V = valve and MP = metering pump)

in series and insuring that no radioactivity is trapped in the second column.

6.3.1.7 The CO₂ absorbent must not interfere with the accurate measurement of radioactivity in the liquid scintillation counter by incompatibility with any other reagent.

7. Reagents and Materials

7.1 Compost for this testing may be made up in accordance with either of the following recipes, municipal solid waste (MSW) or woody compost, or obtained from an active municipal solid waste or yard waste composting center.

7.1.1 Compost, designed to stimulate municipal solid waste (MSW) organic matter, is prepared by combining the following materials (on a dry matter basis): alfalfa meal, 35.7 %; shredded newspaper, 27.2 %; garden soil, 13.2 %; poplar sawdust, 10.4 %; cottonseed meal, 6.4 %; cow manure, 1.6 %; calcium carbonate, 5.3 %; sodium bicarbonate, 0.2 %. The mixture is designed to contain the biochemical ingredients found in MSW (lignified cellulose (newspaper, poplar sawdust and alfalfa meal), protein (cottonseed meal and alfalfa meal), natural inoculum (garden soil and cow manure); soluble carbohydrates and buffering capacity sufficient to maintain a neutral to slightly basic pH). The particle size of the components of the compost mix are sized to pass through a 6-mm screen. Moisture content should be adjusted (see 7.1.3) to 55 to 60 % for testing.

7.1.2 An alternate compost (used to simulate yard compost-

ing activities) was used in an ASTM-ISR study⁴ and has the following composition on a dry matter basis (made up to 55 to 60 % moisture for testing): wood chips (brush), 41.4 %; chapped leaves, 25.4 %; grass clippings, 25.8 %; aged compost, 7.3 %. Different compost preparations can produce different rates of biodegradation. A yard and garden waste compost can, with certain plastics, result in slower rates of degradation.⁴

7.2 The compost is made up to 55 to 60 % moisture by measuring the moisture content of each component, calculating the moisture content of the mix, and adding water to bring the mix to near target moisture percentage. The moisture content can be checked by taking a sample of the compost, weighing it, drying it, reweighing it, and calculating the moisture from the difference in weight. Water can then be added as needed. During the experiment, testing of the moisture content should be checked weekly and maintained at 55 to 60 % by humidifying (bubbling the air through water) the air as needed.

7.3 Liquid culture inoculum are prepared from the target aqueous environment. They can be used directly, that is, sewage sludge or waste water treatment sludge, or eluant from compost, or they can be enriched by growing the mixed culture on the carbon source of interest.

7.4 Media used for liquid culture is related to the environment being simulated. For waste water or sewage sludge, a limited basal media (BAM broth minus glucose) is prepared according to the Handbook of Microbial Media.⁵ This media relies on the plastic for the major source of carbon bond energy.

7.5 The carbon dioxide absorber, methoxyethyl amine⁶ is used to capture CO₂ in the scrubbing columns.

7.6 A liquid scintillation cocktail designed for counting carbon-14 is required. Any commercial scintillation cocktail reagent that is compatible with the CO₂ absorber is acceptable.⁷

8. Hazards

8.1 Compost presents well-known health risks that can be avoided by the use of appropriate protective equipment such as gloves and masks.

8.2 Strong bases used for CO₂ absorption are particularly hazardous and instructions in Material Safety Data Sheets must be followed.

8.3 Radioactive carbon-14 compounds must be handled in accordance with federal and state regulations.

9. Radiolabeled Preparations

9.1 The utility of tagging the carbon in a molecule or a portion of the molecule with the radioactive isotope of carbon,

⁴ ISR Degradable Polymeric Materials Program, *Compilation of ISR Contractor Compost Test Report*, ASTM, 1993.

⁵ R.M. Atlas, *Handbook of Microbiological Media*, CRI Press, Inc., 1993, p. 113.

⁶ Carbosorb® (Packard Instrument Co.) is a strongly basic short-chain amine is a highly efficient CO₂ absorber and is compatible with many scintillation cocktails. Other organic bases can be used for trapping CO₂ but they generally lack the efficiency of methoxyethyl amine. Inorganic bases have several disadvantages for example, they are strong quenching agents, produce severe color or turbidity interference, and have low trapping capacities.

⁷ Although the manufacturer of Carbosorb®, recommends their product Perma-flour E+®, other scintillation cocktails are also compatible, including the Beckman Environmental Cocktail Ready Safe®.

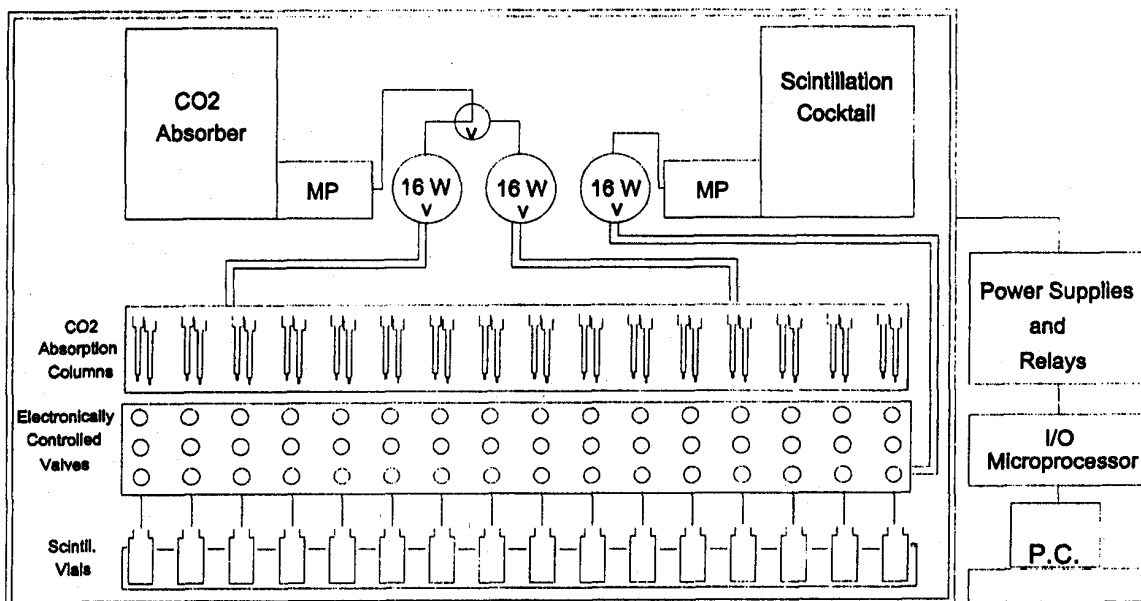


FIG. 4 Fully Automated ¹⁴C CO₂ Collection System for Sixteen Units (MP = metering pump, v = valves, 16Wv = sixteen way valves)

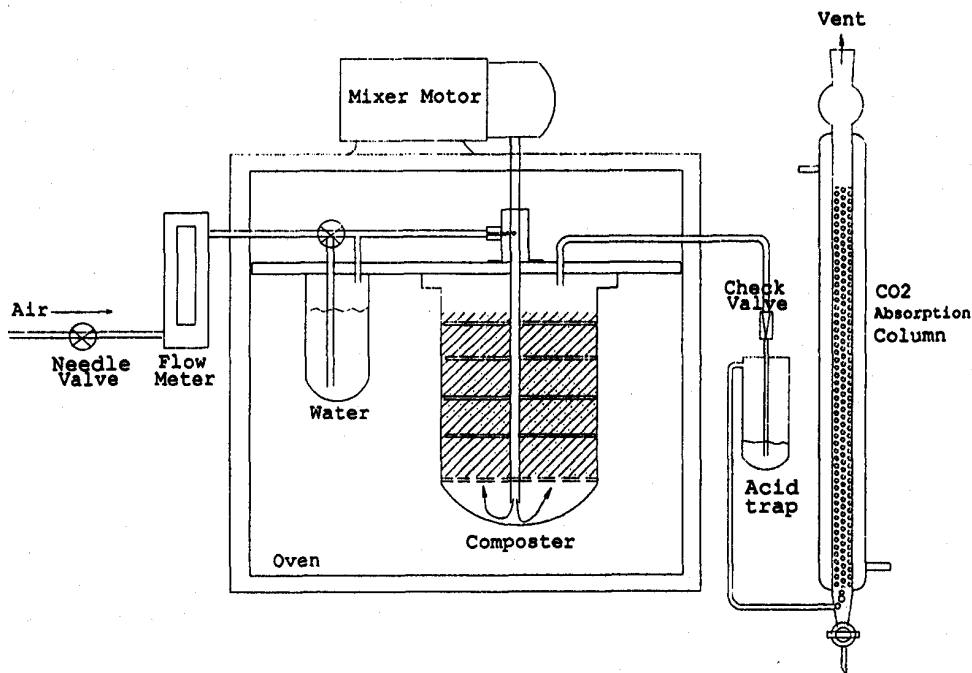


FIG. 5 Automated Radiochemical Composting Apparatus

lies in the ability to detect and distinguish that carbon-14 isotope from a virtual sea of carbon-12 in the compost. This ability to follow or trace that carbon due to its radioactivity requires that the radiochemical purity of the compound be established, that is, verify that only the compound of interest is labeled and no label is present in any other material. This verification requires an analytical technique that can separate the polymer and determine that the radioactivity resides solely in the polymer, and that the structure (NMR analysis) and molecular weight distribution (see D 5296) are the same as the

polymer intended for commercial production.

9.2 Thickness of polymer film can be an important variable for any biodegradation test. Thus, the thickness should be measured by a micrometer and included with any data describing biodegradation rates of polymeric material. Further, in the preparation of such films, take care to produce a film of uniform thickness.

9.3 The radiolabeled plastic should be prepared with an SA of at least 7000 dpm/mg. ASA of 10 000 dpm/mg provides sufficient counts for extended test.

10. Test Method A—Aqueous Environment

10.1 Prepare incubation flasks by adding 75 mL of limited BAM, 2 to 5 mL of inoculum and 50 to 100 mg (>500 000 dpm) of the radiolabeled plastic sample to a 125-mL Erlenmeyer flask.

10.2 Pass oxygen through the water flask and the incubation flask (each maintained at $58 \pm 5^\circ\text{C}$) at a rate of 15 mL/min \pm 2 mL/min.

10.3 Shake the flasks at 100 ± 10 rotations/oscillations per min.

10.4 The gasses leaving the incubation flask pass through the acid trap and then through the CO₂ absorption column containing 4 to 5 mL of methoxyethyl amine cooled to >15°C or through a column containing 8 to 10 mL of methoxyethyl amine without cooling.

10.5 Switch the gas flow to another absorption column in intervals from 4 to 8 h, depending on the objectives of the experiment and the methoxyethyl amine from the original column is drained into a scintillation vial.

10.6 Add 10 to 15 mL of scintillation cocktail to the scintillation vial and count the sample in the liquid scintillation counter set to measure the beta radiation of carbon-14.

11. Test Method B—Compost Environment

11.1 Uniformly distribute the radiolabeled plastic sample, cut in pieces approximately 2 cm²(for film), in approximately 300 g of compost as the compost vessel is filled. Addition of 200 to 300 mg of plastic is sufficient for each composting vessel. Comparative samples should have similar surface areas.

11.2 Partially fill acid traps with concentrated sulfuric acid so as to accommodate the water removed from the airflow.

11.3 Keep the compost vessel and humidifying trap in a $58 \pm 5^\circ\text{C}$ chamber. Record the temperature of each composter daily and ensure that it is within 5°C of the chamber. Raise the temperature of the air to 58°C by passing it through a coil in the heated chamber prior to entering the water trap (humidifying trap). Bypass these humidifying traps during the first 2 to 3 days due to the production of large amounts of metabolic water. Sample the composters at 3 days and weekly thereafter to determine the percent moisture of the compost. If the percent moisture drops to 50 % pass the incoming air through the water traps. Control moisture in the compost at 50 to 60 %.

11.4 Fill the CO₂ absorption columns with >200 mL of methoxyethyl amine. Drain and measure the volume, and place a 2-mL aliquot in a scintillation vial with 15-mL scintillation fluid. Count in a Beta counter calibrated to count carbon-14.

NOTE 1—It is important in the early days of the composting process to monitor the viscosity of methoxyethyl amine by observing the bubble flow. The large quantity of CO₂ evolving during this period can cause the methoxyethyl amine to solidify. Usually a daily collection and refill of methoxyethyl amine will be sufficient. In order to reduce the volatility of this short-chain amine, the column can be cooled by circulating refrigerant at temperatures < 15°C through the jacket of the column. If the absorption column is not cooled, an additional 20 % of the absorbant must be used. Generally, absorption columns are completely drained and refilled once a day.

NOTE 2—Occasionally two phases develop due to larger quantities of water trapped in the methoxyethyl amine, and these two phases can be blended into one by the addition of several millilitres of methanol. During prolonged composting trials (over 20 days) the sampling interval can be

extended depending upon the objectives of the experiment.

11.5 In order to test whether the oxidation of the carbon in the plastic could occur chemically under these composting conditions, it may be necessary to use a sterile control. This is not necessary if the chemistry of the compound being tested is well documented and it is known that chemical oxidation does not occur under these composting conditions.

12. Calculation

12.1 Total dpm in a composting vessel at the start of the test (ST, dpm) is calculated as follows:

$$ST, \text{dpm} = (SA)(LP) \quad (1)$$

where:

SA = specific activity in dpm/mg, and

LP = mg of labeled plastic added to the vessel.

12.2 To calculate the quantity of radioactivity (dpm) detected in CO₂ absorbent, measure the volume of methoxyethyl amine drained from the absorption column. Then, measure the radioactivity in a 2-mL aliquot. Employ the following equation:

$$C, \text{dpm} = [(A1 - B) / Cv] / 2 \quad (2)$$

where:

C, dpm = total dpm per collection,

A1 = dpm in the 2-mL aliquot,

B = background dpm, and

Cv = millilitres from each column collection.

12.3 Calculate the cumulative percent production of carbon-14 carbon dioxide (¹⁴CO₂) or percent of plastic biologically oxidized (P_x, %) using the following equation:

$$P_x, \% = \sum_{1-n} (C, \text{dpm} / ST, \text{dpm}) 100 \quad (3)$$

13. Interpretation of Results

13.1 The ¹⁴CO₂ measured in these test methods are a direct indication of the oxidation of the sample. However, the extent and the rate of oxidation are related to the compost mixture made for that individual test and the form of the sample. Although different batches of compost can produce different results, the compost formula for the simulation of MSW in these test methods will generally give repeatable results. This is due to the selection of common feed ingredients that are standardized in the trade and tend to have a consistent composition. Depending upon the objectives of the test, it is generally wise to include within each test series a standard preparation of known degradation rates and to make test comparisons.

14. Report

14.1 Report the following information:

14.1.1 Data regarding compost temperature and moisture,

14.1.2 Daily (or periodic) production of ¹⁴CO₂,

14.1.3 Cumulative periodic summation of ¹⁴CO₂,

14.1.4 Graphic display of ¹⁴CO₂ summation data comparing treatments, and

14.1.5 Average and standard deviation of replicates if there are sufficient numbers.

15. Precision and Bias

15.1 Measurement of radioisotope labeled (carbon-14)

polymer is inherently non-biased since radioactivity is a direct measure of the polymer carbon. However, an accurate true value is determined only when detection efficiencies are high, interferences are avoided, and proper calibration is performed. This can be accomplished routinely with present scintillation counting techniques.

15.2 Data on the precision and bias of these test methods between laboratories are being determined by a round-robin test, and will be available on or before December 2003.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

D-20

APPLICATION

D-20 ON PLASTICS

This application gives you information about the committee, its scope, officers, and structures. If you would like to become active in the work of this committee, please fill out and mail the application to ASTM Headquarters or fax to 610-832-9667, attention Nancy McAvey, Manager, Member and Committee Services.

SCOPE: The development of test methods, specifications, recommended practices, nomenclature, definitions, and the stimulation of research relating to plastics, their raw materials, components, and compounding ingredients, and to finished products made from plastics such as sheets, rods, tubes, pipes, cellular materials, and molded or fabricated articles.

CHAIRMAN: Paul E. Sample, Samples, Inc., 308 Walden Rd., Wilmington, DE 19803-2424, (302-656-3212), FAX: 302-656-3212

VICE-CHAIRMAN (Methods): Barbara J. Furches, Dow Chemical Co., Engrg Thermoplastics TS&D, 433 Building, Midland, MI 48667 (517-636-8772) FAX: 517-638-9628

VICE-CHAIRMAN (Materials): Stephen B. Driscoll, The University of Massachusetts at Lowell, Plastics Engineering Dept., Lowell, MA 01854 (978-934-3431) FAX: 978-458-4141

VICE-CHAIRMAN (Liaison-Research Special): Gary Lynn Williams, Owens-Corning Science & Technology Center, 2790 Columbus Rd., Rt. 16, Granville, OH 43023-1200 (740-321-7694) FAX: 740-321-7210

VICE-CHAIRMAN (Programs & Education): Debra R. Wilson, Union Carbide Corp., Westhollow Research Center, P.O. Box 4685, Houston, TX 77210 (281-560-1644) FAX: 281-560-1670

VICE-CHAIRMAN (Membership Orientation): George J. Quellette, Montel Polyolefins USA, Inc., 912 Appleton Rd., Elkton, MD 21921 (410-996-1656) FAX: 410-996-1660

SECRETARY: Deborah M. Oates, Underwriters Laboratories, Inc., 333 Pflingsten Rd., Northbrook, IL 60062 (847-272-8800) FAX: 847-509-6306

STAFF MANAGER: Katharine E. Morgan (610-832-9721)

1999 ASTM MEMBERSHIP BENEFITS

SEE COMMITTEE APPLICATION

*One may apply for Society and committee membership on the committee application form.
However, each committee requires a separate application.*

Application is made for membership in ASTM:

- Organizational Membership** — an organizational member shall pay an annual fee and may designate one official representative. This membership entitles your organization to the benefits listed below.
- Individual Membership** — an individual member shall pay an annual fee and may join and participate on ASTM technical committees representing his or her employer, unless unassociated with any organization. This membership entitles the individual to the benefits listed below.

	<u>Organizational</u>	<u>Member</u>
Annual Fee	\$350.00*†	\$65.00*†
Participation on ASTM Technical Committees	One Official Rep. Only	Member Only

Membership Benefits include:

- Contact with industry professionals worldwide
- Greater access to current technical information affecting your field
- Early information on new standards
- Advance notice of revisions to existing standards
- The opportunity to participate in the drafting of standards needed by your industry

As a member you will also receive other benefits, such as, a free volume of the Annual Book of ASTM Standards which contains the standards of interest to you, an annual subscription to *Standardization News* (ASTM's monthly magazine), and reduced prices on ASTM publications.

MEMBERSHIP

- Membership year is January 1 to December 31. Fees are payable in advance and are not prorated. Membership will become effective upon payment of fees.
- Only the official representative of an organizational membership may participate on committees. All other employees of the organization must maintain individual memberships in order to participate on committees.
- An organizational membership may change its representative as needed by notifying ASTM Headquarters.
- Technical committee participation is not transferable. A committee application must be submitted by the new individual member, or the new official representative of an organizational membership.

* Administrative fee payments made to ASTM are not tax deductible as charitable contributions for federal income tax purposes. They may be deductible as ordinary and necessary business expense.

† Canadian Prospective Members - Please add 7% GST - Registration Number R129162244.

NOTE: Membership benefits are subject to change.

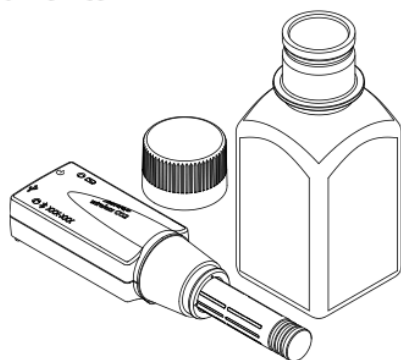
B. Manual del sensor PASCO medidor de dióxido de carbono

Product Manual | 012-15272C

Wireless CO₂ Sensor

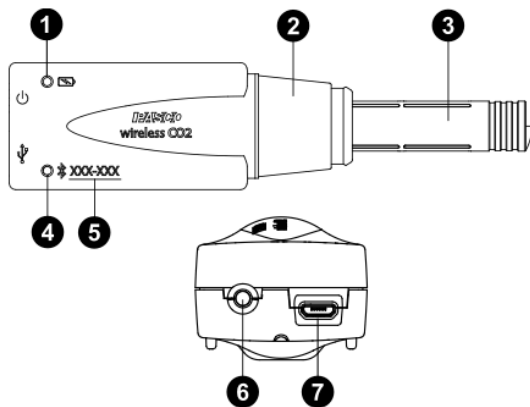
PS-3208

Components



- Wireless CO₂ Sensor
- Gas sampling bottle with cap
- Micro USB cable (not pictured)

Features



1 Battery Status LED

Indicates the battery level and charging status.

Battery LED	Status
Red blink	Low power
Yellow ON	Charging
Green ON	Fully charged

2 Rubber collar

Use to create an airtight seal when the probe is inserted into the sampling bottle.

3 Probe

Contains the infrared CO₂ gas sensing element.

4 Device ID

Use to identify the sensor when connecting via Bluetooth.

5 Bluetooth Status LED

Indicates the status of the sensor's Bluetooth connection.

Bluetooth LED	Status
Red blink	Ready to pair
Green blink	Connected
Yellow blink	Logging data

For information on remote data logging, see the PASCO Capstone or SPARKvue online help.

NOTE: The Bluetooth Status LED is disabled when the sensor is connected to a computer via the micro USB cable.

6 ON/OFF button

Press to turn the sensor on. Press and briefly hold to turn the sensor off. Note that the sensor automatically turns on if connected to a computer or tablet via micro USB cable. To preserve battery, the sensor automatically turns itself off after several minutes of inactivity if not connected.

7 Micro USB port

Use with the included micro USB cable to connect the sensor to a USB charger to charge the battery. The port and cable can also be used to send measurement data to software when connected to a USB port or powered USB hub connected to a computer or mobile device. Note that this connection method is not supported by iOS.

Getting started

Complete the steps in this section (**Get the software**, **Charge the battery**, and **Check for a firmware update**) before using this sensor in the classroom.

Get the software

You can use the sensor with SPARKvue or PASCO Capstone software. If you're not sure which to use, visit [pasco.com/products/guides/software-comparison](https://www.pasco.com/products/guides/software-comparison).

SPARKvue is available as a free app for Chromebook, iOS, and Android devices. We offer a free trial of SPARKvue and Capstone for Windows and Mac. To get the software, go to [pasco.com/downloads](https://www.pasco.com/downloads) or search for **SPARKvue** in your device's app store.

If you have installed the software previously, check that you have the latest update:

SPARKvue: Main Menu > Check for Updates

PASCO Capstone: Help > Check for Updates

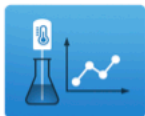
Charge the battery

Charge the battery by connecting the micro USB port to any standard USB charger. The Battery Status LED is solid yellow while charging. When fully charged, the LED changes to solid green.

Check for a firmware update

SPARKvue

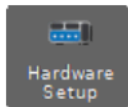
1. Press the power button until the LEDs turn on.
2. Open SPARKvue, then select **Sensor Data** on the Welcome Screen.



3. From the list of available devices, select the sensor that matches your sensor's device ID.
4. A notification will appear if a firmware update is available. Click **Yes** to update the firmware.
5. Close SPARKvue once the update is complete.

PASCO Capstone

1. Press the power button until the LEDs turn on.
2. Open PASCO Capstone and click **Hardware Setup** from the Tools palette.



3. From the list of available wireless devices, select the sensor that matches your sensor's device ID.
4. A notification will appear if a firmware update is available. Click **Yes** to update the firmware.
5. Close Capstone once the update is complete.

Set up the software

SPARKvue

Connecting the sensor to a tablet or computer via Bluetooth:

1. Turn on the Wireless CO₂ Sensor. Check to make sure the Bluetooth Status LED is blinking red.
2. Open SPARKvue, then click **Sensor Data**.
3. From the list of available wireless devices on the left, select the device which matches the device ID printed on your sensor.

Connecting the sensor to a computer via micro USB cable:


1. Open SPARKvue, then click **Sensor Data**.
2. Connect the provided micro USB cable from the micro USB port on the sensor to a USB port or powered USB hub connected to the computer. The sensor should automatically connect to SPARKvue.

Setting up a data display:


1. Select the measurement you intend to record from the **Select measurements for templates** column by clicking the check box next to the relevant measurement's name.
2. Click **Graph** in the **Templates** column to open the Experiment Screen. The graph display will automatically be set to measure the selected measurement versus time.

PASCO Capstone


Connecting the sensor to a computer via Bluetooth:

1. Turn on the Wireless CO₂ Sensor. Check to make sure the Bluetooth Status LED is blinking red.
2. Open PASCO Capstone, then click **Hardware Setup**  in the **Tools** palette.
3. From the list of **Available Wireless Devices**, click the device which matches the device ID printed on your sensor.

Connecting the sensor to a computer via micro USB cable:



1. Open PASCO Capstone. If desired, click **Hardware Setup**  to check the connection status of the sensor.
2. Connect the provided micro USB cable from the micro USB port on the sensor to a USB port or powered USB hub connected to the computer. The sensor should automatically connect to Capstone.

Setting up a data display:

1. Double-click the **Graph**  icon in the **Displays** palette to create a graph display.
2. In the graph display, click the **<Select Measurement>** box on the y-axis and select an appropriate measurement from the list.

Hardware setup and data collection

After connecting the sensor to your software of choice and setting up a data display, follow the steps below to begin collecting data.

1. Insert the probe into the sampling bottle, using the rubber collar to form an airtight seal.
2. Allow the sensor to equilibrate for at least 3 minutes.
3. *Optional:* If desired, calibrate the sensor. For information on calibrating the Wireless CO₂ Sensor, see the PASCO Capstone or SPARKvue online help.
4. Place a sample into the bottle, then quickly reseal the bottle with the sensor.
5. Click **Start**  (SPARKvue) or **Record**  (Capstone) to begin collecting data.

Extended calibration

If there is significant drift or the concentration value is outside the expected range, even after performing the initial calibration, the extended calibration procedure should be used. (Note that the extended calibration procedure requires a longer warm-up time.) For more information on the extended calibration procedure, see the PASCO Capstone or SPARKvue online help and search for "**Calibrate a Wireless CO₂ Sensor**".

Storage and maintenance

- Do not use or store the sensor in a highly dusty environment.
- Avoid direct sunlight or heat radiation.
- Do not let the sensor get wet. Use a Dissolved CO₂ Waterproof Sleeve (PS-3545) if solution-based determination is required.

Software help

The SPARKvue and PASCO Capstone Help provide information on how to use this product with the software. You can access the help within the software or online.

SPARKvue

Software: Main Menu > Help

Online: help.pasco.com/sparkvue

PASCO Capstone

Software: Help > PASCO Capstone Help

Online: help.pasco.com/capstone

Specifications and accessories

Visit the product page at pasco.com/product/PS-3208 to view the specifications and explore accessories. You can also download experiment files and support documents from the product page.

Experiment files

Download one of several student-ready activities from the PASCO Experiment Library. Experiments include editable student handouts and teacher notes. Visit pasco.com/freelabs/PS-3208.

Technical support

Need more help? Our knowledgeable and friendly Technical Support staff is ready to answer your questions or walk you through any issues.

-  Chat pasco.com
-  Phone 1-800-772-8700 x1004 (USA)
+1 916 462 8384 (outside USA)
-  Email support@pasco.com

Limited warranty

For a description of the product warranty, see the Warranty and Returns page at www.pasco.com/legal.

Copyright

This document is copyrighted with all rights reserved. Permission is granted to non-profit educational institutions for reproduction of any part of this manual, providing the reproductions are used only in their laboratories and classrooms, and are not sold for profit. Reproduction under any other circumstances, without the written consent of PASCO scientific, is prohibited.

Trademarks

PASCO and PASCO scientific are trademarks or registered trademarks of PASCO scientific, in the United States and in other countries. All other brands, products, or service names are or may be trademarks or service marks of, and are used to identify, products or services of, their respective owners. For more information visit www.pasco.com/legal.

Product end-of-life disposal



This electronic product is subject to disposal and recycling regulations that vary by country and region. It is your responsibility to recycle your electronic equipment per your local environmental laws and regulations to ensure that it will be recycled in a manner that protects human health and the environment. To find out where you can drop off your waste equipment for recycling, please contact your local waste recycle or disposal service, or the place where you purchased the product. The European Union WEEE (Waste Electronic and Electrical Equipment) symbol on the product or its packaging indicates that this product must not be disposed of in a standard waste container.

CE statement

This device has been tested and found to comply with the essential requirements and other relevant provisions of the applicable EU Directives.

FCC statement

This device complies with part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions:

- (1) This device may not cause harmful interference, and (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

Battery disposal



Batteries contain chemicals that, if released, may affect the environment and human health. Batteries should be collected separately for recycling and recycled at a local hazardous material disposal location adhering to your country and local government regulations. To find out where you can drop off your waste battery for recycling, please contact your local waste disposal service, or the product representative. The battery used in this product is marked with the European Union symbol for waste batteries to indicate the need for the separate collection and recycling of batteries.

C. Ficha técnica de flujómetro Marca GASTEK

GASTEK

FLUJOMETROS DE OXIGENO Y AIRE PARA GASES MEDICINALES CON CONEXIÓN TIPO CHEMETRON

ISO9001-2015

Permiten la correcta dosificación de Oxígeno u Aire al paciente

CARACTERISTICAS TECNICAS :

- * HECHOS DE BRONCE CROMADO PARA LARGA DURACION
- * DISEÑO PARA TRABAJO PESADO
- * 5000 CICLOS MINIMOS DE VIDA
- * CUPULA DE POLICARBONATO RESISTENTE A GOLPES
- * VALVULA DE AGUJA DE PRECISION
- * BOLITA MEDIDORA DE ACERO QUE EVITA LECTURAS ERRONEAS POR EFECTO DE ELECTRICIDAD ESTATICA
- * PERILLA DE CONTROL GRANDE Y ERGONOMICA
- * CONEXIONES DE ENTRADA /SALIDA NORMA CGA
- * CODIFICACION DE COLORES DE ACUERDO AL GAS
- * DISEÑO DE PRESION COMPENSADA



INFORMACION PARA ORDENAR

Gas	Rango Flujoómetro	1/8 NPTH	Chemetron	Ohmeda	Diss
Oxígeno	0 – 1 LPM	1-82-301-1	1-82-311-1	1-82-321-1	1-82-331-1
Oxígeno	0 – 3.5 LPM	1-82-301-3	1-82-311-3	1-82-321-3	1-82-331-3
Oxígeno	0 – 15 LPM	1-82-301	1-82-311	1-82-321	1-82-331
Oxígeno	0 – 40 LPM	1-82-301-40	1-82-311-40	1-82-321-40	1-82-331-40
Oxígeno	0 – 70 LPM	1-82-301-70	1-82-311-70	1-82-321-70	1-82-331-70
Aire	0 – 15 LPM	1-82-401	1-82-411	1-82-421	1-82-431
Aire	0 – 40 LPM	1-82-401-40	1-82-411-40	1-82-421-40	1-82-431-40
Aire	0 – 70 LPM	1-82-401-70	1-82-411-70	1-82-421-70	1-82-431-70
Dióxido de carbono	0 – 15 LPM	1-82-701	1-82-711	1-82-721	1-82-731

ESPECIALISTAS EN TERAPIA RESPIRATORIA , EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA GASES MEDICINALES

XIV. Glosario

ASTM: American Society for Testing and Materials. Organización que desarrolla y publica estándares internacionales para materiales, productos, sistemas y servicios.

ASTM D5338: Norma que establece un método estándar para determinar la biodegradabilidad aeróbica de plásticos en condiciones controladas de compostaje.

Biodegradabilidad: Capacidad de los materiales para descomponerse en sustancias más simples mediante la acción de microorganismos en condiciones ambientales específicas.

Biopolímero: Macromoléculas producidas por organismos vivos, algunos de los cuales son biodegradables.

Compost: Producto de la descomposición biológica de materia orgánica bajo condiciones aeróbicas controladas, utilizado como fertilizante.

Compostaje: Proceso de descomposición controlada de materia orgánica por microorganismos en presencia de oxígeno, que produce compost.

CO₂ (Dióxido de carbono): Gas que se produce durante el proceso de biodegradación de materiales orgánicos en compostaje.

Difusor de aire: Dispositivo utilizado para distribuir el aire uniformemente en un sistema, como en un compostaje aeróbico.

Flujómetro: Dispositivo que mide la velocidad o el caudal del fluido que fluye por una línea.

Lignocelulósico: Material compuesto por lignina, celulosa y hemicelulosa, comúnmente encontrado en plantas.

PHA (Polihidroxialcanoato): Poliester alifático biodegradable producido por bacterias mediante la fermentación de azúcares o lípidos.

PLA (Ácido poliláctico): Poliester biodegradable que proviene de recursos renovables como el maíz, el trigo o la papa.

pH: Medida de la acidez o alcalinidad de una solución.

Polímero: Sustancia compuesta por macromoléculas formadas por la unión de monómeros.

Resistencia eléctrica: Dispositivo utilizado para generar calor mediante la conversión de energía eléctrica en calor, comúnmente usado para controlar la temperatura en sistemas.

Tasa de flujo: Cantidad de fluido que pasa por una sección determinada de un sistema en un tiempo específico.