



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM



EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE PELÍCULAS DE POLIETILENO CON ADITIVO PRO-OXIDANTE EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE

Tesis

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

OCTAVIO BAÑUELOS LÓPEZ

ASESORA: DRA. MARIA TERESA ORTA LEDESMA

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO. 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos.

A mi mami.

Este año se gradúan dos personas, tú y yo, esperando que te sientas muy satisfecha de tu gran logro como madre al ver a tu tercer hijo graduado, porque sabemos que no ha sido nada fácil el camino que has recorrido para ver este sueño convertido en una realidad; has sido y serás un gran ejemplo para nosotros, tus hijos, que sin duda alguna estamos muy agradecidos con dios por darnos una madre ejemplar que nunca se dejó doblegar por las circunstancias. Siéntete orgullosa de ti misma, de ver a tus hijos convertidos en uno profesionales, de ver que sola pudiste sacarnos adelante.

Gracias mami por nunca dejarme solo en las mejores y peores circunstancias, por tus consejos, tus regaños, tus bendiciones al salir de casa, gracias por ser como eres. Celebremos juntos este, nuestro logro.

A mis hermanos.

Agradezco a ustedes su apoyo, aunque en ocasiones implícito, sé que siempre estuvieron ahí preguntando como iba todo; gracias Gaby porque desde bebe me cuidaste y trataste de guiarme por un buen camino dándome un gran ejemplo a seguir, demostrándome que todo es posible si luchas por ello; Carlos, aunque nos la pasábamos peleando nunca ha faltado esa preocupación del uno por el otro, agradezco que hayas estado ahí apoyándome en lo que se podía y en lo que hasta ahora me has apoyado.

Gracias a los dos, ahora somos dos ingenieros y una licenciada en administración en la familia.

A mi abuelita

Abuelita, sé que jamás pensaste llegar al día en el que tu ultimo nieto se titularía, y ahora hasta bisnietos tienes. Te agradezco el apoyo brindado a mi mama para sacarnos adelante, los consejos que me has dado; nunca olvidare tu frase "te vas a acordar de mí", tus bendiciones y tus rezos que sé, fueron de mucha ayuda en los momentos más difíciles de nuestra carrera. Sin ti y sin mi mamá no seríamos nada. Muchas gracias abuelita. Que dios te guarde muchos años más a nuestro lado.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
Justificación	2
Objetivos.....	3
General.....	3
Particulares.....	3
1. Marco Teórico	4
1.1 Residuos	4
1.1.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	4
1.1.2 Manejo y disposición final de los residuos sólidos urbanos	4
1.2 La composta	9
1.2.1 Historia	9
1.2.2 Definición	10
1.2.3 Tipos de procesamiento de los RSU	11
1.2.4 Propiedades de la composta	12
1.2.5 Principios básicos para la elaboración de composta.....	16
1.2.5.1 Elaboración de composta en una Planta de Compostaje (PdC).....	18
1.2.6 Ventajas y desventajas del proceso de compostaje.	20
1.2.7 Microorganismos en la composta.....	21
1.2.8 Plantas de composta en el Distrito Federal	23
1.3 Polímeros.....	24
1.3.2 Clasificación de los polímeros.	24
Polímeros sintéticos.....	25
1.3.3 El Plástico.....	25
1.3.4 Biopolímeros	28
1.4 La bolsa de plástico	29
1.4.1 Bolsas degradables.....	31
1.4.1.1 Aditivos en las bolsas degradables.....	31
1.4.2 Acciones para la disminución de las bolsas de plástico.	33
2 Metodología.....	35
2.1 Montaje de baño maría y sistemas	35
2.2 Termo-oxidación de las muestras de polietileno	37

2.3 Muestreo de la composta, caracterización y montaje de reactores aerobios.....	38
2.3.1 Muestreo de composta	38
2.3.2 Caracterización de la composta.	38
2.3.3 Montaje de reactores con composta y muestras plásticas.....	45
2.4 Monitoreo de parámetros y cuantificación de CO ₂	46
3 Resultados y discusión.	49
3.1 Caracterización de la composta.	49
3.2 Estimación de la cantidad de CO ₂ teórica (ThCO ₂).....	50
3.3 Producción de CO ₂ durante el proceso experimental.....	51
3.4 Evaluación del porcentaje de biodegradación.	53
4 Conclusiones.....	55
Anexos.	59
Anexo I.....	59
Anexo II.....	61
Anexo III.....	63
Anexo IV	64
Anexo V	65

INTRODUCCIÓN.

La intensificación de la industrialización que se presentó en México durante la segunda mitad del siglo pasado, produjo una mayor demanda de materias primas para satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una población en aumento y con patrones de consumo cambiantes y cada vez más demandantes. A la par crecieron la generación de residuos de distintos tipos y los problemas asociados para su disposición adecuada, así como las afectaciones a la salud humana y a los ecosistemas (SEMARNAT-c, 2012). En la actualidad, en todo el mundo, incluyendo México, existe una problemática importante por la contaminación del agua, aire y suelo, ocasionada en gran medida por los grandes volúmenes de residuos que se generan diariamente y que reciben escaso o nulo tratamiento adecuado. Si bien, por sus características de peligrosidad la mayoría de los plásticos sintéticos no representan un riesgo para el ambiente; el problema real es mayor, porque no pueden ser degradados por el entorno. Al contrario de lo que ocurre con la madera, el papel, las fibras naturales o incluso el metal y el vidrio, los polímeros de origen antropogénico (plásticos) no se oxidan ni se descomponen con el tiempo (INE, 2003).

Cualquiera que sea el campo en el que el hombre se desenvuelva, ya sea industrial, agrícola, social y/o doméstico, la huella de su paso se irá marcando por una carga de residuos, es decir, la mayoría de las cosas que, de una u otra forma, ha utilizado. La generación de residuos sólidos es una actividad propia del hombre. Nada ha caracterizado mejor a la sociedad contemporánea como su enorme capacidad de consumo. El control y manejo de la basura es uno de los principales problemas hoy en día en México, por lo que se tienen que tomar medidas para controlar la producción y el manejo de residuos urbanos. En el Distrito Federal se concentra casi la octava parte de los residuos sólidos que se generan en todo el país. A últimas fechas, se ha presentado un incremento importante en la cantidad de residuos que se generan en la Ciudad de México. Diariamente se generan 12,513 toneladas de basura, lo que significa que cada habitante produce cerca de 1.43 Kg de basura diariamente. Esta gran cantidad de basura provoca grandes desequilibrios

ambientales que para la mayoría de los habitantes son desconocidos. Por otro lado, el manejo de los grandes volúmenes de basura representa problemas de difícil solución y enormes costos económicos para el gobierno de la Ciudad (SMADF, 2013).

Justificación

La separación de los residuos sólidos se tornó obligatoria en el Distrito Federal a partir de la necesidad de la reducción de los mismos, de igual manera para favorecer el reciclaje y fomentar a los ciudadanos hábitos que ayuden a tener un mejor lugar en el cual desenvolverse. Por otra parte, las bolsas de plástico representan una gran problemática debido a su tiempo de degradación, aunque ya se hayan implementado el uso de bolsas de plástico llamadas oxo-degradables, existe la problemática de que no pueden ser introducidas a los procesos de reciclaje de las bolsas de plástico comunes; esto debido a los aditivos contenidos en las bolsas oxo-degradables. El Consejo Americano de Química (American Chemical Council, ACC) ha argumentado que en un comparativo de las bolsas de plástico con respecto a las de papel se requiere 70% menos energía para producir las primeras y 91 % menos de energía para reciclar 1 kg de éstas. Por otro lado las bolsas de plástico usan menos material que las de papel y un aspecto muy importante es que se usa 6% menos agua para producirlas (Hernández, 2011).

Por lo anterior, en este trabajo de tesis se busca conocer el impacto ambiental que se tiene al introducir una película de polietileno con aditivo pro-oxidante (similar a una bolsa oxo-degradable) al proceso de compostaje.

Objetivos.

General

Evaluar a nivel laboratorio si las películas de polietileno con aditivo pro-oxidante son susceptibles a biodegradación en un proceso de compostaje mediante la cuantificación de CO₂ producido.

Particulares

- Seleccionar la composta adecuada para la experimentación a nivel laboratorio en base a la cuantificación de C y N respecto a las modificaciones realizadas a la normatividad mexicana vigente.
- Monitorear la producción de CO₂ en reactores aerobios controlados que simulan el proceso de compostaje, mediante su captura con NaOH y titulación con HCl.
- Evaluar el porcentaje de biodegradación del plástico en función del CO₂ teórico (ThCO₂) estimado y el CO₂ experimental.
- Evaluar la factibilidad de incorporar las bolsas de polietileno en el proceso de compostaje.

1. Marco Teórico

1.1 Residuos

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define a los residuos como aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido, semisólido, líquido o gases y que se contienen en recipientes o depósitos. En función de sus características y orígenes se clasifica en tres grandes grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), Residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP) (SEMARNAT-c, 2012). Por el enfoque de este trabajo de tesis, se hará mayor referencia a los residuos sólidos urbanos.

1.1.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos son aquéllos generados en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales orgánicos e inorgánicos que se utilizan en las actividades domésticas. Proviene también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados de otra índole.

La descomposición de los residuos orgánicos produce biogás que resulta desagradable por el olor que genera, además de ser peligroso por su toxicidad e incluso, por su explosividad. Dicho biogás está compuesto por: bióxido y monóxido de carbono (CO_2 y CO , respectivamente), metano (CH_4), ácido sulfhídrico (H_2S) y trazas de compuestos orgánicos volátiles (COV's, entre ellos, acetona, benceno, estireno, tolueno, y tricloroetileno).

1.1.2 Manejo y disposición final de los residuos sólidos urbanos

El manejo adecuado de los RSU tiene como objetivo final proteger la salud de la población, reduciendo su exposición a lesiones, accidentes, molestias y enfermedades causadas por el contacto con los desperdicios, y evitar el impacto potencial que podrían ocasionar sobre

los ecosistemas. Sin embargo, la situación del manejo de estos residuos dista mucho de ser la adecuada a lo largo del país. Aún a la fecha es relativamente común que los residuos se depositen en espacios cercanos a las vías de comunicación o en depresiones naturales del terreno como cañadas, barrancas y cauces de arroyos. En el ciclo de vida de los residuos, después de su generación existen diversas etapas para su manejo, entre las que destacan su recolección, reciclaje y disposición final.

a) Recolección

En 1998 se recolectaba cerca del 85% de los residuos generados en el país, cifra que en 2011 alcanzó 93%. Sin embargo, cuando se considera el tamaño de las localidades, la situación es distinta: en 2011, en las zonas metropolitanas del país, la cobertura en la recolección de los residuos alcanzó 90%, mientras que en las ciudades medias fue de 80%, en las pequeñas de 26% y en las localidades rurales o semiurbanas alcanzó 13% (SEMARNAT-c, 2012).

La recolección tiene por objeto retirar los RSU de la fuente generadora (hogar, comercios, oficinas, mercados, rastros, etc.), a fin de concentrarlos en un punto de transferencia, centro de acopio para su proceso (reciclaje o tratamiento) o, de otra manera llevarlos directamente al sitio de disposición final. Al llevar a cabo un sistema de recolección es importante considerar si se va a establecer un sistema de recolección separada y definir la clasificación de los subproductos. (SEMARNAT, 2001)

b) Reciclaje

A pesar de que el volumen de RSU que se recicla en el país se ha incrementado en los últimos años, aún resulta bajo. De acuerdo con las cifras obtenidas en los sitios de disposición final, en 2011 se recicló 4.8% del volumen de RSU generados; no obstante, esta cifra podría alcanzar el 10% en virtud de que muchos de los RSU susceptibles de reciclarse se recuperan antes de llegar a los sitios de disposición final, tanto en los contenedores como en los vehículos de recolección. Del volumen total de RSU reciclados

en 2011, el mayor porcentaje correspondió a papel, cartón y productos de papel (42.2%), seguido por vidrio (28.6%), metales (27.8%), plásticos (1.2%) y textiles (0.2%). Por otro lado, si se considera el volumen reciclado de cada tipo de RSU con respecto a su volumen producido, los sólidos que más se reciclaron en 2011 fueron los metales (39% del total de metales generados), el vidrio (23.5%) y el papel (14.7%). De los plásticos y textiles solo se recicla alrededor del 0.5% de cada uno (SEMARNAT-c, 2012).

c) Disposición final

La disposición final de los residuos se refiere a su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones cuyas características permitan evitar su presencia en el ambiente y las posibles afectaciones a la salud de la población y de los ecosistemas. En el país se cuenta con dos tipos de sitios de disposición final: los rellenos sanitarios y los rellenos de tierra controlados. Los rellenos sanitarios constituyen la mejor solución para la disposición final de los residuos sólidos urbanos; este tipo de infraestructura involucra métodos y obras de ingeniería particulares que controlan básicamente la fuga de lixiviados y la generación de biogás. Por otra parte, los rellenos de tierra controlados, aunque comparten las especificaciones de los rellenos sanitarios en cuanto a infraestructura y operación, no cumplen con las especificaciones de impermeabilización para el control de los lixiviados. Los sitios de disposición final (tanto los rellenos sanitarios como los sitios controlados) de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 deben:

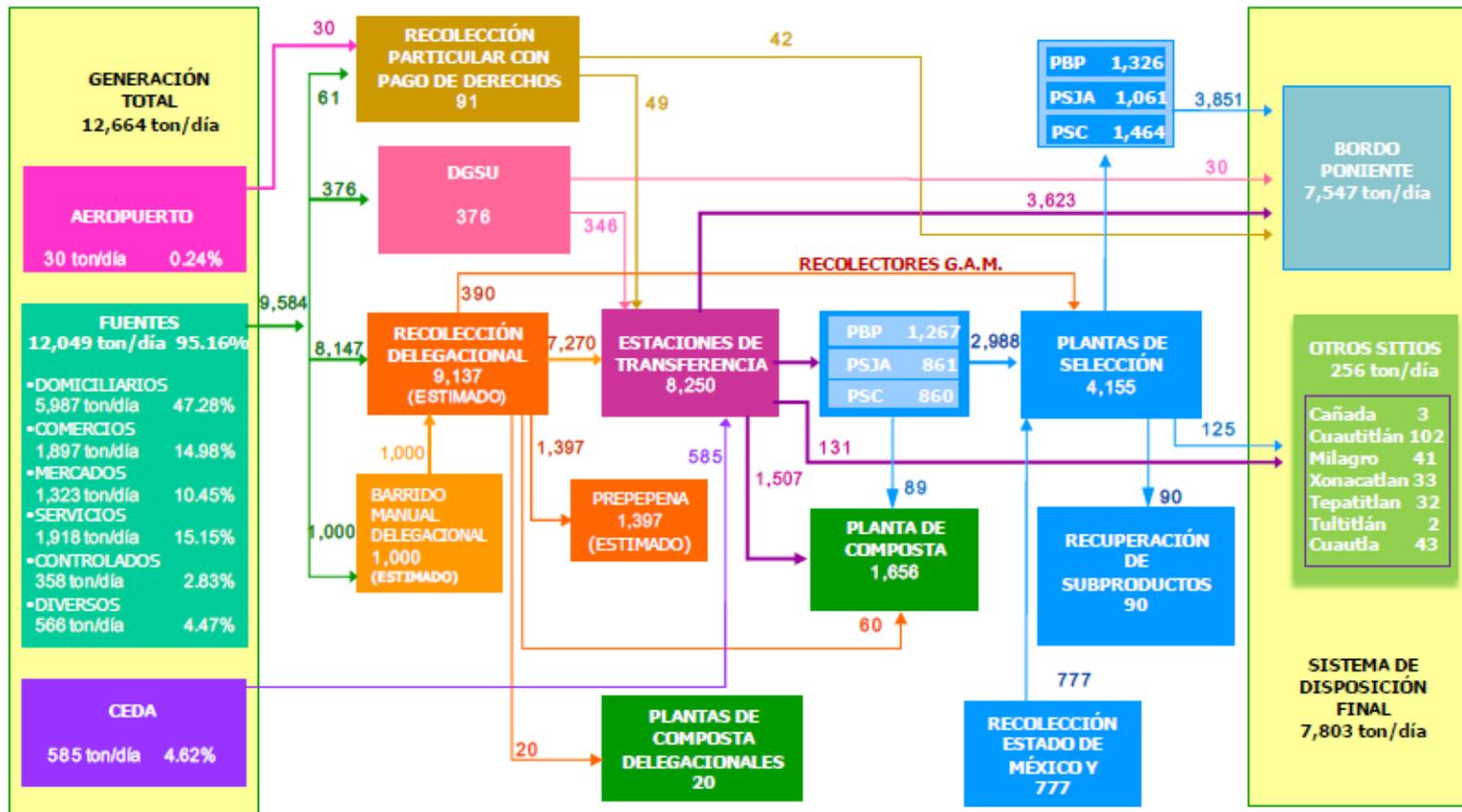
1. Garantizar la extracción, captación, conducción y control del biogás generado.
2. Garantizar la captación y extracción de los lixiviados.
3. Contar con drenaje pluvial para el desvío de escurrimientos y el desalojo del agua de lluvia.
4. Controlar la dispersión de materiales ligeros, así como la fauna nociva y la infiltración pluvial.

d) Traslado

Se aplica el término estación de traslado a las instalaciones en donde se hace el traslado de basura de un vehículo recolector de capacidad de 3 a 5 toneladas, a otro vehículo con mucha mayor capacidad de carga (20 a 30 toneladas). Este segundo vehículo, es el que traslada los RSU hasta su destino final. El objetivo básico de las estaciones de traslado es incrementar la eficiencia global del servicio de recolección a través de la economía en el sistema de transporte y en la disminución del tiempo ocioso de la mano de obra empleada en la recolección (SEMARNAT, 2001).

Lo anterior se resume en la figura 1.1 Diagrama de flujo de los residuos sólidos urbanos. En el cual se describe el proceso de los RSU en el Distrito Federal.

Fig. 1.1 Diagrama de flujo de los residuos sólidos urbanos.



Fuente: Secretaria de Obras y Servicios del Distrito Federal, 2011.

1.2 La composta

1.2.1 Historia

Sin duda alguna, el compostaje se practicaba desde la antigüedad. Los israelitas, griegos y romanos utilizaban directamente residuos orgánicos o los residuos ya compostados. Unos de los primeros usos del estiércol en la agricultura se remontan a la era de Mesopotamia (2350-2150 a.C.). Las primeras civilizaciones de Sudamérica, China, Japón e India practicaban la agricultura y usaban desechos humanos y animales como fertilizantes (Epstein, 2011).

El compostaje es una técnica que se ha practicado por los agricultores desde hace cientos de años para la obtención de abono. Se trataba de un proceso lento que se llevaba a cabo por apilamiento tanto de residuos domésticos como de los procedentes de los excrementos de los animales y de las cosechas, que no aseguraba en modo alguno ni la calidad ni la higiene del producto obtenido. El desarrollo de esta técnica tiene su origen en la India a principios del siglo XX a raíz de las experiencias llevadas a cabo por el agricultor inglés Sir Albert Howard. Establecía que la elaboración de “compost” tenía como objetivo dirigir materiales frescos de origen agrícola, antes de ser incorporados al suelo, para evitar que las bacterias terminaran su proceso en el suelo, a expensas del nuevo cultivo (Cabildo M., *et ál*, 2008).

El composteo en México.

Las primeras plantas de compostaje en México se construyeron a finales de la década de 1960 y a principios de la década de 1970. Estas plantas generaron grandes expectativas; los objetivos de los promotores en esa época eran similares a los que se tienen hoy en día: recuperar materias primas para la industria de reciclaje, prolongar la vida útil de los sitios de disposición final, y mejorar la calidad de vida de los pepenadores. Para lograr los objetivos, los gobiernos municipales o estatales invirtieron capital para acondicionar los sitios de operación, adquirir maquinaria necesaria y capacitar a los operadores. Desgraciadamente, cerca de la tercera parte de las plantas instaladas en México han ido cerrándose por diversas razones como lo son: técnicas, económicas, administrativas,

políticas y/o sociales. Tales fueron los casos de las plantas de Guadalajara, Monterrey y San Juan de Aragón. Las plantas de Acapulco y Villahermosa se construyeron pero nunca operaron. También fracasaron las plantas de Oaxaca y Morelia.

Por otra parte, muchas plantas han logrado superar obstáculos diversos y mantenerse en operación a través de los años. Se tienen algunos ejemplos de plantas que continúan en operación y que logran los objetivos de reducción de RSU llevados al sitio de disposición final, así como los objetivos educativos, son las de Bordo Poniente, Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Jiutepec, Querétaro y Jalapa, entre otras.

Un estudio piloto del Instituto Nacional de Ecología (INE) realizado en el año 2005, identificó 61 plantas de compostaje, que estaban operando, o que hubieran operado en algún momento, en México (SEMARNAT-a, 2006).

1.2.2 Definición

- “Compost”, humus obtenido artificialmente por la descomposición bioquímica en caliente de residuos orgánicos. (Diccionario de la Real Academia Española, 2001)
- Es un abono orgánico que se forma por la degradación microbiana de materiales acomodados en capas y sometidas a un proceso de descomposición; los microorganismos que llevan a cabo la descomposición o mineralización de los materiales ocurren de manera natural en el ambiente; el método para producir este tipo de abono es económico y fácil de implementar (SAGARPA, 2010).
- Es el producto de la degradación aeróbica de residuos orgánicos. Es un material inodoro, estable y parecido al humus que no representa riesgo sanitario para el medio ambiente natural y social (SEMARNAT-a, 2006).
- El composteo es la descomposición de la materia orgánica por microorganismos en un ambiente con condiciones controladas, facilitando un incremento de la temperatura (comúnmente entre 55 y 60 °C) para destruir los patógenos. Los niveles de oxigenación y de humedad de este proceso también son controlados para reducir el potencial de producción de malos olores. Durante el proceso, los

materiales orgánicos son degradados a un material parecido al humus con excelentes propiedades para el suelo, con un pH en rangos de 6.5 a 8, que favorece el crecimiento saludable de las plantas y tiene la capacidad de retención de agua (SEMARNAT, 2001).

1.2.3 Tipos de procesamiento de los RSU

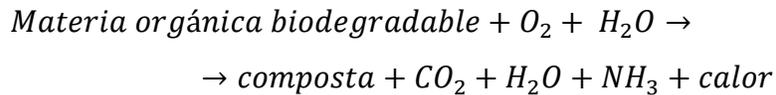
Proceso aerobio (compostaje aerobio)

El compostaje aerobio es el proceso biológico más frecuentemente utilizado para la conversión de la fracción orgánica de RSU a un material húmico estable conocido como "compost". Las posibles aplicaciones del compostaje aerobio incluyen 1) residuos de jardín, 2) RSU separados, 3) RSU orgánicos no seleccionados y 4) compostaje conjunto con fangos de aguas residuales. Todos los procesos de compostaje aerobio son similares en cuanto que incorporan tres pasos básicos 1) preprocesamiento de RSU, 2) descomposición aeróbica de la fracción orgánica de los RSU, 3) preparación y comercialización el producto (Tchobanoglous G,1999).

Proceso anaerobio (digestión anaeróbica de RSU)

La digestión anaerobia de RSU es un proceso biológico en el cual se fermentan los residuos orgánicos en concentraciones de sólidos iguales. El proceso de fermentación anaerobio de sólidos en baja concentración se utiliza en muchas partes del mundo para generar gas metano a partir de los residuos humanos, animales y agrícolas, y a partir de la fracción orgánica de los RSU. Una de las desventajas del proceso de digestión anaeróbica es que deberán de añadirse considerables cantidades de agua a los residuos para que el contenido de sólidos este en el rango ya mencionado. (Tchobanoglous G, 1999).

De acuerdo a Cabildo M., *et ál*,(2008), la composta está formada por minerales y humus, material orgánico complejo, homogéneo, amorfo, inodoro y de color oscuro, que en su descomposición origina, a su vez, sales minerales, dióxido de carbono y amoniaco.



La composta de alta calidad, hecha a partir de fracciones seleccionadas de los residuos, tiene la probabilidad de ser colocada en el mercado; la composta de baja calidad, hecha a partir de residuos mezclados, tiene aplicaciones limitadas.

Los principales factores que afectan la velocidad de descomposición de la materia orgánica durante el proceso de composteo son el oxígeno y la humedad, otros factores secundarios que afectan el proceso son la temperatura y los nutrientes, principalmente carbono y nitrógeno. La velocidad de descomposición es función de la actividad microbiana. Varias condiciones pueden limitar o reducir la actividad microbiana, y ésta a su vez influye sobre la temperatura y la velocidad de descomposición. Por ejemplo:

- Baja humedad.
- Bajo contenido de oxígeno.
- Falta de espacio libre para que se lleve a cabo la circulación del oxígeno.
- Falta de carbono disponible o materia orgánica degradable.

Otras condiciones con menor importancia, que pueden afectar el proceso de descomposición son:

- Nutrientes inorgánicos disponibles.
- Presencia de sustancias tóxicas.

1.2.4 Propiedades de la composta

Temperatura

Los cambios en la temperatura son el resultado de la actividad microbiana, como se muestra en la figura 3.2, existirá un aumento de la temperatura ambiente a temperatura mesofílica y posteriormente a temperatura termofílica. Durante esta variación de

temperatura, la población de microorganismos cambia. Estos cambios son muy profundos, ya que permiten a los diferentes microorganismos metabolizar los diversos componentes de la materia prima. La temperatura es muy importante para el control de patógenos así como para la destrucción de las semillas de malezas (plantas dañinas a los sistemas de producción de cultivos).

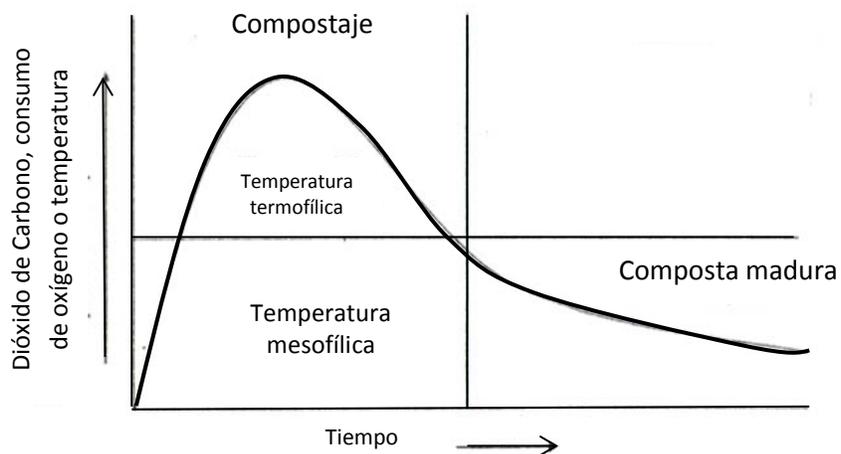


Fig. 1.2 Evolución de la temperatura respecto al tiempo (Epstein, E., 2011).

A medida que avanza el proceso y los nutrientes disponibles para los microorganismos son consumidos o metabolizados, la temperatura descenderá hasta estar cerca de la temperatura ambiente. La velocidad de la producción de calor es proporcional a la materia orgánica disponible para el consumo microbiano. La disminución de la temperatura cerca a la del ambiente es un indicador de que el proceso está cerca de completarse y que el material, probablemente, es estable y maduro.

Ha habido algún debate sobre la temperatura óptima para la descomposición de la materia orgánica. Una razón para esta controversia es que diferentes materias primas o materiales se descomponen más rápidamente a diferentes temperaturas; algunos datos en la literatura indican que la temperatura óptima se encuentra entre 50 y 60°C, otro autor menciona que la máxima producción de CO₂ ocurre a temperaturas entre 60 y 65°C; por otra parte se tiene que la máxima descomposición de RSU ocurre a temperaturas entre 65 y 70°C. Diversas investigaciones reportan que el máximo consumo de oxígeno ocurre entre 45 y 66°C. Debido a que el consumo de oxígeno es función de la actividad

microbiana, el máximo consumo debe indicar la temperatura óptima para que se logre una mejor descomposición.

La temperatura óptima de la descomposición termofílica es de 50° a 60°C considerando a la producción de CO₂; en algunas ocasiones la actividad microbiana puede alcanzar hasta 76°C, situación no deseable, debido que a temperaturas de 64°C la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco es muy alta. Si la temperatura no aumenta, indica que hay un defecto de aireación, baja relación C/N o un bajo nivel de humedad. Temperaturas elevadas, mayores de 65°C, prolongadas, pueden ocasionar la muerte de bacterias benéficas, lo que frena la fermentación y provoca pérdidas de nitrógeno (SAGARPA, 2010)

El mantenimiento de la temperatura a menudo está en función de las condiciones de operación. Por ejemplo:

- Estructura de la pila.
- Volumen de la pila.
- Humedad de la pila.
- Oxigenación de la pila.
- Condiciones ambientales.
- Frecuencia de los volteos.

Carbono y Nitrógeno (C/N).

Los dos nutrientes más importantes para la actividad y crecimiento de los microorganismos que afectan el proceso de compostaje son el carbono y el nitrógeno. Una mayor cantidad de carbono que de nitrógeno hará más lento el proceso de compostaje; una mayor cantidad de nitrógeno que de carbono liberará amonio. El carbono proporcionado a los microorganismos de la materia prima es utilizado para el crecimiento celular; durante el metabolismo microbiano, el dióxido de carbono es desprendido y liberado a la atmósfera. A medida que avanza el proceso, la actividad microbiana disminuye al igual que el desprendimiento de CO₂.

Los microorganismos requieren de nitrógeno para llevar a cabo la síntesis de proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos, enzimas y co-enzimas necesarios para el crecimiento celular (Cabildo M., *et ál*, 2008). La cantidad de nitrógeno varía según el tipo de residuos, los microorganismos utilizan carbono y nitrógeno en una proporción de 30:1. Baja relación C/N (mayor cantidad de N) resulta en una volatilización de nitrógeno en forma de amonio, de igual manera se desencadena un crecimiento bacteriano el cual agota el oxígeno y se corre el riesgo de que el proceso se convierta de aerobio a anaerobio y se tengan problemas de olores.

Humedad.

La humedad puede ser un factor limitante en el proceso de compostaje. Cuando los niveles de humedad en la composta están por debajo del 40% al 20% la actividad microbiana es esencialmente cesada. Cuando en la composta la humedad excede el 60%, los pequeños espacios pueden ser llenados por agua, en consecuencia a esto el oxígeno puede ser limitado y con ello disminuir la actividad microbiana, por lo cual, el nivel de humedad óptimo es cercano a un 50%. El control de la humedad es importante, ya que, con el incremento de temperatura se pierde agua y conlleva a tener un proceso seco sin actividad microbiana (SAGARPA, 2010).

Oxígeno y aireación.

La composta es un proceso aeróbico y por tanto requiere de oxígeno, el cual será adquirido a través de aireación. El abasto de oxígeno dependerá del proceso de aireación que es función del sistema a utilizar. Para que el oxígeno llegue a la población microbiana es necesario tener suficiente porosidad en la pila de composta; la porosidad depende de la materia prima, del contenido de humedad y del tamaño de partícula (Epstein, 2011).

Generalmente se requiere incrementar la aireación por medio de volteos periódicos de las pilas; con estas acciones, además de suministrarse oxígeno se disipa el calor producido dentro de la pila. El consumo de oxígeno es directamente proporcional a la actividad

microbiana; por ello existe una relación directamente proporcional entre el oxígeno consumido y la temperatura. La mayor cantidad de oxígeno se requiere durante la fase inicial de la descomposición, debido al crecimiento de la población microbiana, el incremento en la temperatura y la gran actividad bioquímica; durante la fase de estabilización, la demanda de oxígeno decrece (SAGARPA, 2010).

Porosidad y tamaño de partícula

Se entiende por porosidad la suma del volumen de los poros ocupados por agua y por aire referidos al volumen total de la pila. La actividad microbiana suele trascurrir en la superficie de las partículas orgánicas. A medida que el proceso avanza se produce una disminución en el tamaño de partícula, que se traduce en un aumento de superficie, y por tanto, en una mayor actividad microbiana y en un aumento de la velocidad de descomposición. Existe una relación directa entre el tamaño de partícula y la porosidad (Cabildo M., *et ál*, 2008).

pH

El pH es otro parámetro importante para evaluar el ambiente microbiano y la estabilización de residuos. El valor de pH, como la temperatura, del compost varía con el tiempo durante el proceso de compostaje (Tchobanoglous G. 1999). Las bacterias requieren un pH entre 6 y 7.5 y los hongos entre 5.5 y 8.0. El pH inicial de la materia orgánica suele estar entre 5 y 7, siendo necesario, de no ser así, se debe modificar mediante la adición de alcalinizantes o acidificantes. Cuando el proceso comienza, las bacterias y los hongos al digerir la materia orgánica liberan ácidos y el pH suele ser de 5. Transcurridos tres días comienza la etapa termofílica en la que el pH puede alcanzar valores de 8.5, que mantiene durante el resto del proceso (SAGARPA, 2010).

1.2.5 Principios básicos para la elaboración de composta.

Mientras más variada sea la materia orgánica, mejor será la descomposición y calidad de la composta, es necesario disponer de una mezcla de compuestos de alta y baja relación

carbono/nitrógeno que va a depender de las características de los productos de origen animal o vegetal.

Los residuos sólidos que tienen baja relación C/N se descomponen con mayor rapidez. Por ese motivo, es mejor mezclar residuos con baja relación C/N como viseras de pescado y plantas frescas con residuos de alta relación C/N como restos de caña de azúcar, paja y hojas secas de árboles. En la preparación de la composta, la mezcla adecuada de residuos orgánicos debe tener una relación inicial C/N de aproximadamente 25 a 50.

La materia en descomposición debe tener 50% de humedad. La aireación se logra volteando el material que se está compostando, el volteo es importante pues evita las condiciones anaeróbicas dentro de la pila de composta ya que se oxigena el material y se favorece la actividad microbiana que participa en la degradación de los materiales. (SEMARNAT, 2001) En la figura 1.3 se muestra en forma simplificada el proceso de compostaje.

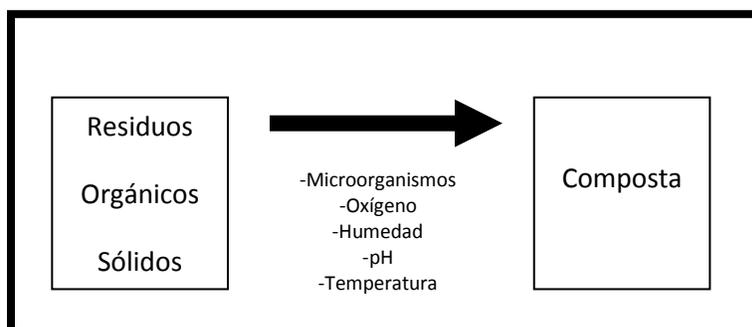


Figura 1.3. Proceso de compostaje.

Los pasos principales para elaborar composta se resumen como sigue:

1. Separación de la materia orgánica.
2. Trituración y mezclado uniforme de todos los elementos.
3. Composteo.
4. Tamizado.
5. Almacenamiento.
6. Venta o distribución.

7. Aplicación.

El método más recomendado para preparar la composta es a través de cúmulos (pilas), que se construyen de materia orgánica sobre la superficie del suelo, lo que resulta fácil implementar y permite procesar de manera continua los residuos orgánicos. Debe de tener una altura de 1.2 a 1.5m, o mayor siempre y cuando se tengan los medios para procesarla, una altura menor dificultaría el calentamiento natural de la masa que se procesa, el largo del cúmulo depende de la cantidad de residuo orgánico disponible. El proceso de compostaje dura aproximadamente tres meses. Es importante establecer mecanismos de seguridad para evitar que el agua penetre a los cúmulos en la época de lluvia, además, se deberán tomar en cuenta las condiciones ambientales durante las diferentes estaciones del año que puedan afectar el proceso de compostaje.

1.2.5.1 Elaboración de composta en una Planta de Compostaje (PdC).

Las operaciones unitarias en ingeniería son aquellos elementos de una planta que se diseñan independientemente. A continuación se presentan las diferentes operaciones unitarias de una PdC. Estas operaciones son: separación de residuos, reducción de tamaño, formulación, transporte, degradación, aireación, humectación, pasteurización, maduración, cribado, secado y empacado (SEMARNAT-a, 2006).

- **Separación de Residuos.** Consiste en eliminar de la fracción orgánica los elementos que no se degradan biológicamente y aquellos que pueden causar la contaminación de las operaciones biológicas. Es una operación que se recomienda efectuar fuera de la planta, en el lugar mismo en que se generan los residuos, pero es posible realizarla en la planta.
- **Reducción de tamaño (molienda).** También se conoce como trituración. Es una operación que puede no ser incluida para RSU orgánicos, pero que es indispensable para residuos de poda. Consiste en reducir el tamaño de los materiales para facilitar la degradación.

- **Formulación.** Adición de diferentes tipos de residuos y agentes químicos que facilitan el compostaje; pueden emplearse ácidos y bases que permiten el ajuste de pH y una previa reacción química.
- **Transporte.** Cambio de la localización física de los materiales en el interior de la planta. Incluye su movimiento desde la admisión de la materia prima hasta la salida de producto final.
- **Degradación.** Bio-reacción de los componentes orgánicos de la mezcla. Un conjunto diverso de organismos ataca los residuos, transformándolos bioquímicamente durante varios días.
- **Aireación.** Se proporciona suficiente oxígeno a la degradación y se evita de esta forma la proliferación de malos olores y reducción de velocidad en el proceso de compostaje. Ésta puede llevarse a cabo por convección natural o forzada (con uso de motores).
- **Humectación.** Se proporciona la humedad necesaria para la degradación, evitando la inundación o la resequedad de la mezcla.
- **Pasteurización.** Eliminación de los microorganismos patógenos para la salud humana, animal y vegetal en contacto con la composta.
- **Maduración.** Después de la degradación, la actividad biológica y la temperatura tienden a disminuir. Los materiales residuales de la degradación se convierten lentamente en composta. En esta parte se disminuye la frecuencia de volteo o la intensidad de la aireación.
- **Lombricompostaje (opcional).** Acondicionamiento de la composta con ayuda de organismos anélidos (lombrices de tierra) para mejorar las propiedades del producto final. Las lombrices digieren los residuos de la degradación y crean microtúneles que favorecen la aireación y la humectación.
- **Cribado (tamizado, cernido).** Esta operación separa la composta en dos partes: una primera fracción más fina que está lista para su comercialización, y otra fracción de impurezas y residuos de lenta degradación (huesos).

- **Secado.** Esta operación reduce la cantidad de agua en el producto final. Su principal propósito es disminuir los costos de transporte y aumentar la estabilidad biológica del producto.
- **Empacado.** Acondicionamiento final para su comercialización. Protección del producto del sol y la humedad excesivos durante el transporte y almacenamiento. Incluye el pesaje del producto.

1.2.6 Ventajas y desventajas del proceso de compostaje.

En todo proceso existen ventajas y desventajas, en la tabla 1.1 se describen los pros y los contras del proceso de compostaje.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas del proceso de compostaje.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Muchos residuos de una comunidad pueden ser introducidos en la composta, ya sean residuos orgánicos municipales o industriales. • Una planta de composta puede ser diseñada y operada para minimizar el impacto ambiental que tienen los RSU. • Olores y biogás pueden ser controlados, con la tecnología actual, en las instalaciones y operaciones no se deberán de producir olores desagradables. • A partir de la composta se obtiene 	<ul style="list-style-type: none"> • Olores, polvo y la emisión de biogás puede ocurrir durante el proceso. Estos olores y el biogás pueden ser controlados mediante un mejor diseño de las instalaciones y gestión del manejo de los residuos orgánicos. • Las instalaciones de una planta de composta puede ocupar mayor espacio que otras tecnologías de manejo de residuos. A menudo el espacio requerido está relacionado con el almacenamiento y la demanda del mercado.

<p>un producto útil, que como acondicionador de suelos, puede conservar la humedad del suelo y reducir la erosión del mismo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La composta adiciona carbono al suelo, por lo tanto reduce la producción de gases invernadero. 	
---	--

Fuente: Epstein, 2011

1.2.7 Microorganismos en la composta.

Durante el proceso de descomposición se producen muchos cambios tanto en la variedad como en la cantidad de microorganismos presentes. Algunas de las especies crecerán rápidamente debido a la existencia de condiciones más favorables para el desarrollo de estos organismos. Los cambios constatados en la composición de la materia orgánica a lo largo del proceso, así como los producidos en la temperatura son los, que probablemente, ejercen mayor influencia en la población biológica.

Las bacterias (organismos procariotas, es decir, sin núcleo celular diferenciado), son los organismos vivos más pequeños y numerosos responsables de la mayor parte de los procesos de descomposición y de la producción de calor. Las bacterias se van a desarrollar según la etapa en la que se encuentra la composta. Según Cabildo M., *et ál* (2008) al principio, cuando la temperatura está entre 0 y 40°C, predominan las bacterias psicrófilas y mesófilas (*etapa mesófila*), las cuales dan paso rápidamente (cuando la temperatura supera los 40°C) a las bacterias termófilas, dando así lugar a la *etapa termófila*. Al descender la temperatura vuelven a hacer su aparición las bacterias mesófilas cuyas esporas son muy resistentes al calor, al frío y a la falta de humedad o de alimento. Numerosas investigaciones han demostrado que las bacterias termófilas son las que tienen un papel predominante en la descomposición de las proteínas, siendo las

responsables de la intensa actividad observada durante los primeros días del proceso de fermentación.

Los actinomicetos son microorganismos parecidos a los hongos, pero actualmente son considerados como bacterias filamentosas. Los del género *Streptomyces*, son los responsables del olor terroso. Son los que intervienen en la degradación de la celulosa, quitina y lignina. Algunas especies aparecen durante la fase termófila y otras en las fases finales, donde se les puede ver formando como telas de araña de color grisáceo a unos 10-15cm de profundidad de la pila del compost.

Los hongos entre los que se incluyen los mohos y las levaduras, son menores en número que las bacterias aunque tienen mayor masa. Son los responsables de romper polímeros y materiales duros así como residuos orgánicos demasiado ácidos, secos o de bajo contenido en nitrógeno para ser degradados por las bacterias. Están presentes cuando las temperaturas son moderadas y solo pueden soportar temperaturas superiores a 55°C. Existen numerosos microorganismos involucrados en el proceso de compostaje, como se muestra en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Principales microorganismos identificados en el proceso de compostaje.

Microorganismos identificados en la composta	
Bacterias	Actinomicetos
<i>Aerobacter (aerogenes)</i>	<i>Nocardia brasiliensis</i>
<i>Bacillus megatherium</i>	<i>Thermomonospora viridis</i>
<i>B. steatithermophilus</i>	<i>T. curvata</i>
<i>B. cereus</i>	<i>Micromonospora parva</i>
<i>B. Mycoides</i>	<i>M. vulgaris</i>
<i>Pseudomonad sp.</i>	<i>Thermoactinomyces vulgaris</i>
<i>Flavobacterium sp.</i>	<i>Actinoplanes sp.</i>
<i>Micrococcus</i>	<i>Thermopolyspor polyspora</i>
<i>Sarcina sp.</i>	<i>Pseudonocardia</i>
<i>Cellomonas folia</i>	<i>Streptomyces violaceoruber</i>
<i>Chondrococcus exiguus</i>	<i>S.thermoviolaceus</i>
<i>Mycococcus virescens</i>	<i>S. rectus</i>
<i>M. fulvus</i>	<i>S. thermofuscus</i>
<i>Thibacllus thiooxidans</i>	<i>S. thermovulgaris</i>

<i>T. dentrificans</i> <i>Proteus sp.</i>	<i>Thermomonospora fusca</i> <i>T. glaucus</i>
Fungi	
<i>Rhizopus nigricans</i> <i>Rhizoctonia sp.</i> <i>Geotrichum candidum</i> <i>Mucor pusillus</i> <i>Penicillium digitatum</i> <i>Mucor racemosus</i> <i>Torulopsis sp.</i> <i>Aspergillus flavus</i> <i>Absidia (ramosa)</i> <i>Saccharomyces sp.</i> <i>Pulluloria sp.</i> <i>Pythium sp.</i> <i>Hanisenula sp.</i> <i>Trichoderma koningi</i> <i>Talaromyces (Penicillium) duponti</i> <i>Stysanus stmonitis</i> <i>Glibotrys (alaboviridis)</i> <i>Humicola insolens</i> <i>Humicola griseus var.</i>	<i>Absidis orchidis</i> <i>Rhizopus arrhizus</i> <i>Candida (parapsilosis)</i> <i>Cladosporium herbarum</i> <i>Rhodotorula rubra</i> <i>Aspergillus tamaris</i> <i>Zygorhynchus vuilleminii</i> <i>Trichosporon cutaneum</i> <i>Verticillium sp.</i> <i>Synecephalastrum sp.</i> <i>Pichia sp.</i> <i>Cylindrocara sp.</i> <i>Chaetomium (thermophile)</i> <i>Lypomyces sp.</i> <i>Sporotrichium thermophile</i> <i>Fusarium moniliforme.</i>
Protozoarios	Algae
<i>Chilomonoas (paramecium)</i> <i>Cyathomonas (truncate)</i> <i>Lycogala epidendrum</i> <i>Cercomonas (crassicanda)</i>	<i>Hormidium (nitens)</i> <i>Vaucheria (terrestres)</i> <i>Euglena mutabilis</i> <i>Protococcus vulgaris</i> <i>Dactylococcus (bicandatus)</i> <i>Chlorococcum humicola</i> <i>Microcoleus vaginatus</i> <i>Porphyridium (cruentum)</i> <i>Kentrosphaera sp.</i>

Fuente: Epstein, 2011

1.2.8 Plantas de composta en el Distrito Federal

En México se cuenta con infraestructura donde están instaladas plantas de composta en diversos estados del país, por el enfoque de este trabajo en la tabla 3.3 se muestran las plantas de composta instaladas en el Distrito Federal, así como su capacidad y su producción de composta anual; y que están bajo el mando del GDF.

Tabla 1.3 Plantas de composta instaladas en el Distrito Federal.

Planta de Composta	Capacidad instalada (Ton/año)	Cantidad de residuos orgánicos ingresados (Ton/año)	Produccion de composta (Ton/año)
Bordo Poniente	73,000	32,120	8,000
Álvaro Obregón	1,836	1,836	1,413
Cuajimalpa	1,200	960	720
Iztapalapa	1,440	1,127	152
Milpa Alta	1,380	1,380	344
Xochimilco	1,295	446	268
Totales	80,151	37,869	10,897

Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2010

1.3 Polímeros

Los materiales poliméricos ocupan un lugar muy importante en la vida diaria actual. Su extenso uso se debe a las muchas propiedades que estos presentan y que los hacen superiores en prestación y durabilidad a los materiales tradicionales. Entre sus propiedades se pueden destacar, su baja densidad, su gran resistencia a la corrosión, su gran capacidad aislante, y sobre todo la posibilidad de ser fabricados ajustando sus características al uso posterior que se les vaya a dar. Un polímero es una sustancia química formada por muchas unidades o monómeros. Estas unidades repetitivas son moléculas de bajo peso molecular que por reacción química dan lugar al polímero, de naturaleza macromolecular. Algunos polímeros naturales utilizados por el ser humano son la lana, la seda, la madera, el caucho, el algodón, entre otros. Los polímeros son compuestos de naturaleza orgánica, es decir, están formados por átomos de carbono unidos entre sí formando largas cadenas de alto peso molecular y que también contienen hidrógeno, oxígeno, y nitrógeno (Cabildo M., *et ál*, 2008).

1.3.2 Clasificación de los polímeros.

Los materiales poliméricos se agrupan en tres grandes familias según su comportamiento con la temperatura. (Cabildo M., *et ál*, 2008).

- Termoplásticos. Son aquellos que se reblandecen al calentar llegando a fluir y vuelven a ser solidos al enfriar, esto permite que puedan ser moldeados un

número repetido de veces. Las cadenas macromoleculares se encuentran desordenadas enrolladas sobre si mismas pero independientes una de otra; se mantienen unidas por interacciones de tipo electrostático, tipo de Van der Waals. Estos polímeros son solubles en los disolventes orgánicos de uso común.

- Termofijos. Son aquellos que no se reblandecen al calentarlos y que llegan en ocasiones a descomponerse al ser calentados. Las cadenas macromoleculares forman redes tridimensionales unidas por enlaces covalentes.
- Elastómeros. Son los polímeros que presentan propiedades elásticas, pueden ser calentados con moderación sin perder sus propiedades.

Polímeros sintéticos.

Entre los primeros materiales poliméricos sintéticos se puede mencionar la baquelita, descubierta en 1907 por el químico alemán Backeland, al hacer reaccionar el formaldehído con fenol y obtener un producto insoluble, duro y resistente. Los primeros polímeros que se comercializaron fueron el cloruro de polivinilo (PVC) en 1927, el poliestireno (PS) en 1937 y el Nylon 6.6 en 1938. El avance más importante en el siglo XX, en la química de los polímeros, fue el descubrimiento por K Ziegler y G. Natta de la polimerización del etileno con catalizadores para obtener un polímero de estructura ordenada y de alta prestación (Quiroz, F. 2009).

1.3.3 El Plástico.

La evolución del plástico ha sido un proceso largo y puede remontarse a los años 1830's cuando se realizaron experimentaciones con materiales naturales (caucho) y químicos (sulfuros), creando un nuevo material de caucho vulcanizado. A finales del siglo XIX, más experimentos condujeron a disminuir el producto natural, y en consecuencia el aumento del elemento químico. La invención de la bakelita, un material hecho por el hombre, ocurrió en la primera década del siglo XX y puede ser considerado el primer plástico. Posteriormente, el desarrollo del material progreso a pasos agigantados,

despegando en los años de 1950's, con docenas de nuevos tipos de plásticos desarrollados para todos los usos posibles. Desde entonces nuestro consumo de plásticos ha ido incrementando año con año (Black Dog Publishing, 2006).

Definición

- Los plásticos son sustancias orgánicas de alto peso molecular que se sintetizan generalmente a partir de compuestos de bajo peso molecular. También puede obtenerse por modificación química de materiales naturales de alto peso molecular (INE, 2003).
- Son materiales con una naturaleza química polimérica o macromolecular, a los cuales se les añade una serie de aditivos que modifican sus propiedades y mejoran su resistencia. (Cabildo M., *et ál*, 2008)

Los plásticos son materiales sintéticos, hechos del petróleo cuyas estructuras están basadas en la química del carbono. Estas estructuras son por naturaleza flexibles. Mediante el cambio de componentes en la estructura, podemos controlar las propiedades del producto final; esto los hace uno de los materiales más versátiles hoy en día. Otras propiedades de los plásticos son: durabilidad, resistentes al agua, ligeros, bajo costo de producción, excelentes propiedades aislantes. Pero desafortunadamente con estas grandes ventajas antes mencionadas, conlleva a pagar un alto precio; el impacto ambiental que tienen los plásticos en el planeta.

La fabricación del plástico usa el 8% del petróleo del mundo, y produce residuos sólidos dañinos, así como dióxido de carbono, óxido de nitrógeno y dióxido de azufre. Los químicos usados para estabilizar las propiedades de los plásticos aún no han sido probados en humanos, por lo cual, los efectos que estos pueden tener en la población aún no están claros. Ftalatos, dioxinas, bisfenol A (BPA), solo son pocos de los químicos que han causado mayor preocupación. Muchos de ellos se creó que afectan como disruptores hormonales y son posiblemente cancerígenos.

Finalmente, parece ser que los plásticos son prácticamente no biodegradables. Sus largas moléculas poliméricas son demasiado grandes y fuertes, unidas entre sí para poder ser rotas y asimiladas por microorganismos; en consecuencia, esto significa que tomará mucho tiempo para que se logre una degradación. Aun no se tiene claro el tiempo exacto que tarde en degradarse una bolsa de plástico, pero podemos hablar de que se trata de cientos de años. La naturaleza desechable de los plásticos, y la alarmante tasa de consumo, hace que el espacio de los rellenos sanitarios sea un problema realmente preocupante.

Las alternativas de los rellenos sanitarios son, reciclar o incinerar; pero de estas dos, con la incineración se puede recobrar energía. Sin embargo, la incineración de los plásticos contamina el ambiente con dióxido de carbono, contribuyendo al cambio climático. Los químicos usados en la producción del plástico son liberados en la incineración, resultando con esto cenizas con características tóxicas. Por lo anterior parte de la tendencia internacional ha optado por el reciclaje (Black Dog Publishing. 2006).

Usos y aplicaciones

Una de las aplicaciones principales del plástico es el empaquetado, se comercializa una buena cantidad de polietileno de baja densidad (PEBD) en forma de rollos de plástico transparente para envoltorios. El polietileno de alta densidad (PEAD) se usa para películas plásticas más gruesas. Se utilizan también en empaquetado el polipropileno, poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC) y el policloruro de vinilideno. Este último se usa en aplicaciones que requieren hermeticidad, ya que no permite el paso de gases. De igual manera el polipropileno es una buena barrera contra el vapor de agua (INE, 2003).

Degradación y ciclo de vida de los plásticos

Los plásticos a pesar de ser materiales obtenidos por síntesis química y presentar una gran resistencia a los procesos de degradación, tiene un tiempo de vida útil. La degradación de los plásticos se define como la pérdida total o parcial de las propiedades físicas y/o

químicas de un determinado material. La degradación ocurre debido a factores ambientales como la radiación de la luz, el agua, el calor, el aire o las presiones mecánicas sobre el material. Las variaciones físicas del polímero son normalmente pérdida de brillo y color, aumento de la formación de grietas, aparición de zonas pegajosas o endurecimiento. En general, la cadena polimérica se rompe y el polímero pierde peso molecular y también modifica su estructura (Cabildo M., *et ál*, 2008).

Fotooxidación

Reacción de oxidación inducida por la luz, como la pérdida de uno o más electrones de una especie química bajo iluminación, o la reacción de un sustrato con el oxígeno por la influencia de la luz. El oxígeno acelera el proceso de degradación al facilitar la ramificación de cadenas, a través del grupo hidroperóxido, y la incorporación de grupos que contienen oxígeno en la entidad molecular (Costa, J.M. 2005).

Biodegradación

A pesar de la gran resistencia de los materiales poliméricos, ciertos tipos de polímeros cuando ya han sido sometidos a procesos de fotooxidación son susceptibles a ser atacados por microorganismos, hongos y levaduras. Según la ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials) define un polímero biodegradable como el polímero capaz de descomponerse en CO₂, metano, agua, compuestos inorgánicos o biomasa debido a la acción enzimática de microorganismos, de manera controlada en un periodo específico.

1.3.4 Biopolímeros

Biopolímeros, conocidos también como plásticos biodegradables. Estos pueden ser divididos en cuatro categorías: almidón, azúcar, celulosa y materiales sintéticos. Cada uno de ellos con sus ventajas y desventajas (Black Dog Publishing, 2006).

- **Almidón:** este es un polímero natural que puede derivarse de papas, maíz, trigo y otras fuentes. La constitución química del almidón puede ser modificada tal que puede ser derretido y reformado. La desventaja es que el almidón solo puede tener un corto periodo de contacto con el agua antes de que este comience a desintegrarse, por tanto no es adecuado para transportar líquidos, pero es adecuado para los procesos de formación de plástico tales como el moldeo por inyección.
- **Azúcar:** polímeros a base de azúcar, o polilactidos, son derivados de la sacarosa o almidón, que posteriormente son sometidos a un proceso de fermentación bacteriana, esto significa que las bacterias hacen crecer gránulos de un plástico natural dentro de sus células, para después ser cosechado. Variando la composición de nutrientes en las bacterias, es posible ajustar las propiedades del material, por lo cual este tipo de biopolímero puede resistir al agua. Sin embargo, el alto precio del polilactido reduce la probabilidad de ser usado para empaquetamiento.
- **Celulosa.** El principal ingrediente en el celofán, usado para empacar dulces y cigarrillos, es biodegradable y puede ser compostado. Se tiene una larga historia de su uso como en el embalaje y como simple película para el uso en otros materiales. Sin embargo, como los polilactidos, su precio es alto y no puede competir con otros polímeros como el polipropileno.
- **Material sintético.** Es posible crear plásticos biodegradables usando componentes sintéticos. Existen numerosos experimentos con estos nuevos componentes, y aunque el precio se mantiene alto, existen altas esperanzas para su desarrollo. Es importante tener en cuenta que a pesar de que estos plásticos sean biodegradables, su principal ingrediente seguirá siendo el petróleo.

1.4 La bolsa de plástico

La bolsa de plástico es un objeto cotidiano utilizado a gran escala para contener y transportar mercancías en el mercado mexicano. Algunos de los factores que han

favorecido el uso masivo de la bolsa de plástico son: a) la distribución generalizada a “título gratuito”, b) su practicidad, c) fácil accesibilidad para el consumidor, además de ofrecer ventajas mercadotécnicas para la industria y el comercio al convertirse en un mecanismo publicitario económico (SEMANAT-b, 2009).

Las primeras bolsas de plástico se hicieron en 1957 y se emplearon para guardar el sandwich. Luego en los 70's las tiendas departamentales comenzaron a usarlas como una moda para que los compradores salieran de ellas con bolsas que tenían el distintivo de la empresa y las cadenas de supermercados iniciaron su distribución en los años 80's.

Esto bastó para que las familias dejaran de usar la clásica bolsa del mandado a principios de los años 90's y entonces, los comerciantes de tianguis, mercados tradicionales y tiendas de abarrotes tuvieron que comenzar a distribuir las bolsas de plástico entre sus clientes, muchas de ellas con distintivos como una carita feliz o el mensaje inscrito de “gracias por su compra”.

A nivel mundial, a partir de 2002, comenzó la tendencia hacia la racionalización y prohibición en la producción, distribución y uso de bolsas de plástico. Irlanda en Marzo de 2002, se convirtió en el primer país en anunciar la aplicación de un impuesto de 15 centavos de euro por cada bolsa que se produzca; el dinero recaudado se emplea para proyectos medioambientales. Desde entonces, esa ola que empezó en Europa se extendió a Asia, África y América, donde la ciudad de San Francisco fue la primera del hemisferio en determinar, en Marzo de 2007, la sustitución paulatina de bolsas de plástico en supermercados y tiendas por unas hechas con almidón de maíz que se degradan y se pueden emplear como abono. En las ciudades las bolsas generan graves estragos. En el Distrito Federal, se señaló que la contaminación por bolsas de plástico es el principal problema en temporada de lluvias porque se tiran de manera indiscriminada en las calles y tapan tuberías, cañerías y el drenaje, lo que genera severos encharcamientos e inundaciones (Alcántara, 2009).

1.4.1 Bolsas degradables

Las bolsas degradables que actualmente se comercializan en México emplean la tecnología oxodegradable, esto es, polímeros (PEAD o PEBD) con aditivos principalmente a base de metales, cuya función es acelerar el proceso de degradación, oxidando las cadenas de carbono de los plásticos mediante su activación con luz UV, temperatura y humedad, en un periodo diseñado por el fabricante aproximado de 18 a 24 meses. La producción de polímeros oxodegradables no representa un cambio significativo con respecto al proceso de manufactura de los polímeros convencionales, siendo básicamente la adición del aditivo la única variable al proceso convencional (del orden del 1 a 2 % del total).

El tipo y cantidad de aditivo a utilizar depende de las consideraciones de diseño del fabricante, como lo son el tiempo de vida de anaquel, región de uso y tipo de disposición final, entre otros.

La degradación de los polímeros potencializa la biodegradación, al reducir su tamaño molecular a fracciones que pueden ser biodisponibles para microorganismos que transforman el plástico en bióxido de carbono, biomasa y materiales inertes. Por lo cual, para que un plástico sea considerado oxo-biodegradable debe satisfacer al menos dos requisitos: fragilizarse lo suficientemente rápido para desaparecer visualmente en condiciones de exposición exterior o enterrado en el suelo, proceso conocido como degradación, y que el material degradado sea susceptible al ataque microbiológico produciendo una conversión completa a biomasa en un tiempo apropiado, sin la liberación de productos tóxicos, proceso que completa la biodegradación (SEMARNAT-b,2009).

1.4.1.1 Aditivos en las bolsas degradables.

Los aditivos pro-oxidantes también llamados pro-degradantes se usan para generar una fragmentación acelerada del material plástico con el objetivo de disminuir su peso

molecular, el tamaño de las cadenas del polímero, su carácter hidrófobo y para la formación de compuestos más livianos y lábiles a los metabolismos de los organismos microbianos como bacterias, hongos y algas, para facilitar su bio-asimilación después de pasado el proceso abiótico de degradación. Los aditivos pro-oxidantes usados son compuestos en cuya estructura se encuentran metales de transición que son altamente eficientes para la descomposición homolíticamente de los hidroperóxidos en dos radicales altamente reactivos. Se presentan en forma de carboxilatos o acetilacetonas o con cualquier compuesto orgánico que sirva como ligante. Los metales más usados son Mn^{2+} , Fe^{3+} y Co^{2+} para aditivos usados en la industria de los empaques plásticos y Ni^{2+} para la industria de las películas plásticas agrícolas. El proceso degradativo se puede resumir en dos etapas: una oxidación abiótica y un ataque biótico. El aditivo añadido durante el proceso de fabricación en determinadas concentraciones es activado por algún factor abiótico, especialmente luz y/o calor para reaccionar con el oxígeno ambiental y formar radicales libres, fundamentalmente peróxidos e hidroperóxidos que reaccionan con el polímero favoreciendo la producción de macro radicales poliméricos que volverán a reaccionar con el oxígeno para generar la rotura de la cadena; en las cuales se producirán productos de bajo peso molecular como cetonas, aldehídos, alcoholes, lactonas, ácidos carboxílicos y dicarboxílicos, alcanos y alquenos de bajo peso y otros que en su conjunto son susceptibles al ataque enzimático de los microorganismos.

Pasado el proceso abiótico, la etapa biótica se lleva a cabo mediante la bio-asimilación de los compuestos oxidados del plástico, en especial los que contengan grupos carbonilos que pueden ser atacados, oxidados e hidrolizados biológicamente por hidroxilasas y oxigenasas y ser usadas en los procesos de respiración en la cual entran en el ciclo denominado TCA o de los ácidos tricarboxílicos para terminar en CO_2 y H_2O .

El funcionamiento del aditivo dependerá fuertemente de la estructura del material, de su grado de cristalinidad, sus ramificaciones, entrecruzamientos, complejidad, cantidad de impurezas, entre otros, debido a que los puntos sensibles del material facilitaran el proceso global de degradación (Quiroz F., 2009).

1.4.2 Acciones para la disminución de las bolsas de plástico.

Reciclar significa que todos los desechos y desperdicios que generamos en nuestras vidas se vuelven a integrar a un ciclo natural, industrial, o comercial mediante un proceso cuidadoso que permita llevarlo a cabo de manera adecuada y limpia (INE, 2003). Existen diversos problemas en el reciclaje del plástico. Uno de los más importantes es que varios tipos de polímeros deben ser reciclados por separado, y hasta ahora, no hay manera de hacerlo mecánicamente. En México, las campañas de acopio de residuos sólidos para el reciclaje han ido en aumento, con el fin de conservar los recursos naturales, tener una gestión integral de residuos y disminuir los factores de estrés al ambiente. La experiencia de acopio de bolsas de plástico por autoservicios indica que se acopia hasta un 5% de éstas. Las empresas recicladoras de plástico establecen convenios para la compra de desechos post-industriales, originados principalmente por el embalaje de las materias primas. Por otro lado, los desechos plásticos también se recolectan en tiraderos, rellenos sanitarios o centros de transferencia. Refiriéndose a las bolsas de plástico, éstas se recuperan en un porcentaje mínimo ya que la mayoría se encuentran contaminadas debido a su uso para contención y transporte de la basura doméstica. Sin embargo, existe una recolección incipiente de bolsas de plástico en condiciones adecuadas para el reciclaje que son transferidas a centros de acopio a través de programas como los de recolección y acopio en escuelas. La cantidad de bolsas post-consumo que son recicladas como materia prima para la fabricación de nuevos productos de plástico es muy baja, del orden del 1 al 2 % (SEMANAT-b, 2009).

¿Qué se ha hecho en el Distrito Federal para evitar la alta demanda de bolsas de plástico?

Algunas de las soluciones que se han implementado para reducir el problema que se tiene hoy en día con las bolsas de plástico, puede ser el uso de materiales degradables. En la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal se menciona en el artículo 6° Fracción IX “Los criterios y normas que emita la Secretaría deberán considerar los principios de reducción, reciclaje y reutilización en el manejo de las bolsas de plástico”. Dichos criterios y normas

garantizarán que el ciclo de vida de las bolsas de plástico no sea mayor a diez años, procurando la utilización de materiales provenientes de recursos renovables como los biopolímeros para su pronta biodegradación en los destinos finales. Las bolsas de cualquier otro material no plástico, que garanticen su reutilización y reciclaje no estarán sujetas a este plazo. En el caso de las bolsas que cuenten con un aditivo que sea incompatible con el reciclaje, estas deberán garantizar tener un ciclo de vida menor a cinco años. Actualmente no existe ningún reglamento o norma para evaluar la degradabilidad de estas bolsas en México (Hernández, Y., 2011).

2 Metodología.

En este capítulo se describen las técnicas experimentales llevadas a cabo en la realización de este trabajo, el cual obedece al método de prueba de la ASTM-D-5338-98.

La experimentación fue dividida en cuatro partes.

1. Montaje del baño maría y de los sistemas (reactores aerobios y frascos de captura de CO₂).
2. Termo-oxidación de las muestras de polietileno con y sin aditivo, a introducir en los reactores aerobios
3. Muestreo de composta en planta de composta de Bordo Poniente, caracterización de la misma, y montaje de reactores aerobios con composta y muestras plásticas.
4. Monitoreo de condiciones óptimas para la experimentación y cuantificación de CO₂

2.1 Montaje de baño maría y sistemas

Como es sabido, el término baño maría se emplea para referirse a la técnica mediante la cual se consigue calentar suave y uniformemente una sustancia. El baño maría es un procedimiento que consiste en introducir un recipiente en otro mayor, que contiene agua en ebullición. El baño maría utilizado en la experimentación fue de forma rectangular, construido de acrílico y de dimensiones 130cm x 70cm, en el cual fueron colocadas 3 resistencias de 1000W (ver figura 2.1). En el interior del baño maría se introdujeron los reactores aerobios (frascos de vidrio con capacidad de 1L) conectados éstos a su vez a 6 frascos de plástico con capacidad de 1L; de los cuales 2 fueron conectados en línea al inicio del sistema, agregándole a uno de éstos NaOH con la finalidad de capturar el CO₂ del aire proveniente de la bomba, al frasco restante se le agregó agua para humedecer al mismo; los frascos conectados a la salida de aire del reactor (cuatro), tres fueron llenados con NaOH, en los cuales fue capturado el CO₂ producido por los reactores aerobios. (ver figura 2.2).



Figura 2.1. Baño maría

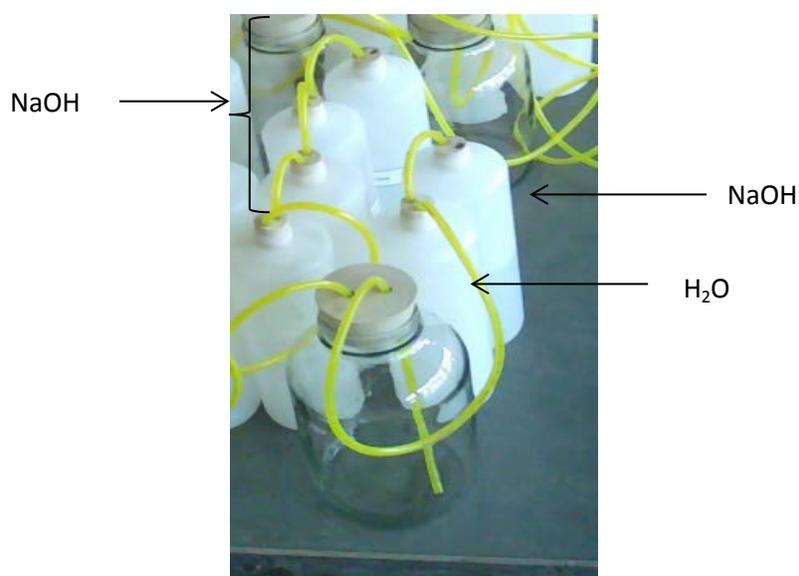


Figura 2.2. Reactores aerobios.

En total fueron montados 24 reactores, 6 sistemas por 4 réplicas cada una, quedando como sigue (ver figura 2.3):

- Sistema celulosa + composta.
- Sistema composta.
- Sistema polietileno con aditivo de cobalto (PeCo) termo-oxidado + composta.
- Sistema polietileno con aditivo de manganeso (PeMn) termo-oxidado + composta.
- Sistema polietileno termo-oxidado PeTO + composta.
- Sistema polietileno sin tratamiento (PeST) + composta.



Figura 2.3. Sistema completo (24 reactores).

2.2 Termo-oxidación de las muestras de polietileno

La termo-oxidación es una forma de degradación de los plásticos, la cual consiste en someter la muestra a una temperatura durante un determinado tiempo. Para el caso de nuestra experimentación, el tiempo y la temperatura adecuadas fueron seleccionadas a partir de pruebas previas, las cuales consistieron en la exposición de muestras de películas de polietileno con y sin aditivo a diferentes condiciones de tiempo y temperatura, a dichas películas se le realizaron pruebas de índice de carbonilo y elongación a la ruptura; los resultados fueron reportados en otro trabajo de tesis del equipo de trabajo. Por lo cual las muestras de película de polietileno con y sin aditivo que fueron introducidas a los reactores aerobios fueron previamente termo-oxidadas durante 12 días a una temperatura de 50°C en un horno marca Felisa modelo: FE-291A (Ver figura 2.4).



Figura 2.4. Horno Felisa.

2.3 Muestreo de la composta, caracterización y montaje de reactores aerobios

2.3.1 Muestreo de composta

Se muestreó composta en fase de maduración (humus) del relleno sanitario de Bordo Poniente IV etapa en la cual está ubicada la planta de composta. Se recolectaron aproximadamente 30 Kg, de composta, la cual fue tomada de varias pilas y revuelta para obtener un producto más homogéneo (ver figura 2.5).



Figura 2.5. Muestreo relleno sanitario Bordo Poniente.

2.3.2 Caracterización de la composta.

En el capítulo 1 se describe en que valores se deben encontrar los parámetros óptimos para una composta de buena calidad, como lo es la relación C/N, pH y humedad. La

caracterización de la composta fue llevada a cabo a partir de algunas modificaciones realizadas a la normatividad mexicana vigente, ya que el uso de reactivos por mencionar es muy alto, y al realizar las pruebas previas con menor cantidad de éstos, no existía variación entre los resultados. Los parámetros a medir en la caracterización fueron:

- NMX-AA-024-1984, Determinación de nitrógeno total.
- NMX-AA-021-1985, Determinación de materia orgánica.
- NMX-AA-018-1984, Determinación de cenizas.
- NMX-AA-067-1985, Determinación de la relación Carbono/Nitrógeno.
- NMX-AA-025-1984, Determinación de pH, método potenciométrico.
- NMX-AA-016-1984, Determinación de humedad.

Determinación de nitrógeno total.

En la NMX-AA-024-1984 se establece el método Kjendahl para determinar la cantidad de nitrógeno total contenido en los RSU. Por este procedimiento se convierten todos los componentes del nitrógeno oxidados tales como nitratos y nitritos a nitrógeno reducido a sulfato de amonio.

Descripción del método.

Se pesó 1g de muestra (composta) la cual fue colocada en los tubos kjendahl en conjunto con 15 mL de ácido sulfúrico concentrado, 10g de sulfato de potasio, 1g sulfato cúprico, una pizca de reactivo de selenio y de granalla de zinc; estos dos últimos tienen la función de catalizadores (ver figura 2.6). La solución resultante se metió a digestión en el equipo Büchi Digestion Unit K-434 (ver figura 2.7) aproximadamente 3 horas hasta tener una solución de coloración verdosa. Posteriormente el residuo resultante es enfriado y diluido agregando 100mL de H₂O destilada, y llevado a condiciones alcalinas añadiendo 55mL de NaOH a concentración 10N; esto con la finalidad de determinar el amonio (nitrógeno total); el cual es capturado en solución de ácido sulfúrico a concentración 0.1N y

cuantificado volumétricamente con NaOH a concentración 0.1N, mediante destilación en el equipo Büchi Distillation Unit B-324 (ver figura 2.7).

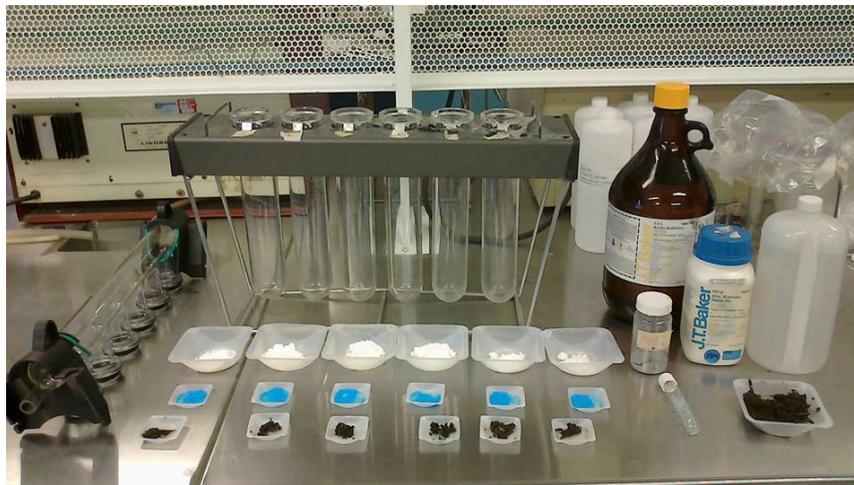


Figura 2.6 Digestión Kjendahl.



Figura 2.7 Sistema de digestión y destilación Büchi.

Para obtener el resultado del porcentaje de Nitrógeno, fue utilizada la siguiente ecuación.

$$N(\%) = \frac{[(A)(N_1) - (B)(N_2)][0.014]}{M} \times 100$$

Dónde:

A = volumen de la solución de H_2SO_4 empleado en la recolección del amoníaco destilado.

N_1 = Normalidad del H_2SO_4 .

B = Volumen de la solución de NaOH empleado en la neutralización de la solución de H₂SO₄.

N₂ = Normalidad de la solución de NaOH,

M = Masa de la muestra en g.

0.014 = Miliequivalente de nitrógeno

Determinación de materia orgánica.

En la NMX-AA-021-1985 se establece el método para determinar la cantidad de materia orgánica en RSU a partir del método Walkley y Black. Esta experimentación se llevó a cabo de la siguiente manera: se realizaron 2 series de 3 muestras, cada una con su respectivo blanco. Se pesó 0.1g de muestra y se coloca en un matraz Erlen Meyer, se adicionaron 10mL de dicromato de potasio a concentración 1N y 20mL de ácido sulfúrico concentrado, la solución se agitó vigorosamente y se dejó reposar durante media hora. Posterior a la media hora, se adicionaron 100mL de H₂O destilada, 10mL de ácido fosfórico, 0.5mL de difenilamina al 1%. La cuantificación de materia orgánica se realiza volumétricamente con sulfato ferroso a concentración 0.5N hasta un vire de violeta oscuro a verde; este paso se realiza matraz por matraz (ver figura 2.8). Nota: debido a que el dicromato de potasio es un oxidante fuerte y el sulfato ferroso es utilizado como agente reductor, estas soluciones fueron preparadas el mismo día que se evaluó este parámetro.

Para obtener el resultado del porcentaje de materia orgánica se utilizó la siguiente ecuación.

$$MO(\%) = \frac{(V_1 N_1 - VNF)K}{M}$$

Dónde:

V₁ = Volumen de la solución de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) empleado en la muestra en mL.

N₁ = Normalidad de la solución de K₂Cr₂O₇.

V = Volumen de la solución de sulfato ferroso (FeSO₄) gastado en la titulación de la muestra en mL.

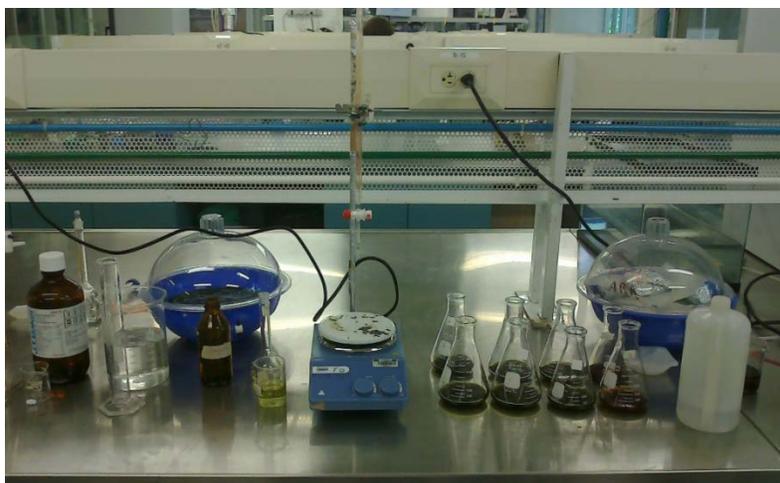


Figura 2.8 Determinación de materia orgánica

N = Normalidad de la solución de FeSO_4 .

M = Peso de la muestra en g.

$K = 0.69$

F = Factor de recuperación que se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$F = \frac{V_0 N_1}{V_B N}$$

Dónde:

V_0 = Volumen de solución de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ empleado en el blanco en mL.

V_B = Volumen de FeSO_4 gastado en la titulación del blanco en mL.

En SSL, (1995) se recomienda que cuando el contenido de carbono orgánico, por el método de Walkley y Black, dé como resultados valores mayores al 8% no debe ser tomado en cuenta, y que el contenido de materia orgánica de la muestra en cuestión deberá de ser evaluado por el método de calcinación. Por lo cual en la NMX-AA-018-1984 se describe el método para obtener el porcentaje de cenizas en la RSU. Debe tenerse presente que con este método se obtienen valores más altos del contenido de materia orgánica, ya que con él se volatilizan todas las formas de carbono orgánico presentes en la muestra (SSL, 1995). El método descrito en la NMX-AA-018-1984 consiste en lo siguiente:

Se ponen a peso constante dos crisoles a temperatura de 200°C durante dos horas, se dejan enfriar y se pesan, posteriormente se coloca en el crisol 0.1g de muestra seca y se

calcina en la mufla a 550°C hasta obtener peso constante, se deja enfriar y se pesa. Para obtener el porcentaje de cenizas se utilizó la siguiente ecuación:

$$C = \frac{G_3 - G_1}{G_2 - G_1} \times 100$$

Dónde:

C = Porcentaje de cenizas en base seca.

G₁ = peso del crisol vacío en g.

G₂ = Peso del crisol más la muestra seca en g.

G₃ = peso del crisol más la muestra calcinada en g.

Determinación de la relación C/N

Para obtener el porcentaje de materia orgánica (MO%) solo restamos el resultado obtenido en el cálculo del porcentaje de cenizas al 100 %; como se muestra en la siguiente ecuación, el cual es equivalente a C_{TOT} a utilizar en la determinación de la producción de CO₂ teórica (ThCO₂).

$$MO(\%) = 100 - C$$

La NMX-AA-067-1985 define la relación C/N como el parámetro utilizado como control de calidad de los RSU dentro de un sistema, utilizando como base la materia orgánica, de la cual ya se ha descrito el cálculo para su determinación, con el objetivo de planear y diseñar un sistema adecuado para la disposición final de los residuos. El cálculo realizado para obtener el valor correspondiente en la experimentación se llevó a cabo en base de la siguiente ecuación.

$$C/N = \frac{(MO\%)(0.58)}{(N\%)}$$

Dónde:

N% = porcentaje de nitrógeno total obtenido según NMX-AA-024-1984

MO% = porcentaje de materia orgánica obtenida según NMX-AA-018-1984.

Determinación de pH

Como ya se ha mencionado el pH es un parámetro clave en el proceso de compostaje, el cual da pauta al desarrollo de bacterias y hongos y en consecuencia el grado de degradación que se tendrá en la composta y en las películas de polietileno. Para la determinación de pH inicial de la composta muestreada, se siguió el método de la NMX-AA-025-1984; el método se describe a continuación:

Se pesaron 10g de muestra y se transfirieron a un vaso de precipitado de 250 ml, se le adicionaron 90mL de H₂O destilada. Posteriormente se sometió a agitación constante durante 10min y se dejó reposar durante 30min. Durante los 30 min se calibró el ph-metro marca Thermo Orion Modelo 420, con soluciones buffer de pH 4, 7 y 11 respectivamente. Pasados los 30min se introduce el electrodo en el vaso de precipitado con la muestra y se obtiene el valor de pH en la muestra. Este procedimiento se hizo por triplicado (ver figura 2.9).



Figura 2.9 Determinación de pH

Determinación de humedad

Parámetro importante para la actividad microbiana y por ende para la producción de CO₂. Como ya se ha mencionado con anterioridad, para que exista una actividad microbiana, la humedad debe de encontrarse en un término medio (50%), para la determinación de ésta

se siguió el método de la NMX-AA-016-1984 la cual establece el método llamado de estufa que determina el porcentaje de humedad, contenido en RSU; se basa en la pérdida de peso que sufre la muestra cuando se somete a las condiciones de tiempo y temperatura específicas, considerando que dicha pérdida se origina por la eliminación de agua.

La prueba se realizó por triplicado, en la cual se introdujeron en una estufa marca Felisa modelo EI-02, (ver figura 2.10), 3 capsulas de porcelana (vacías) durante dos horas a una temperatura de 120-150°C, se sacaron de la estufa y se colocaron en un desecador durante dos horas o hasta obtener un peso constante en una balanza analítica. Se colocó en cada capsula muestra de composta (procurando que sea la misma cantidad en las 3 capsulas). Se introdujeron las 3 capsulas con la muestra de composta a la estufa por 4 horas a una temperatura de 120-150°C. Al pasar las 4 horas se metieron a un desecador para que llegaran a una temperatura ambiente, y se pesaron hasta tener peso constante.



Figura. 2.10 Estufa Felisa EI-02

2.3.3 Montaje de reactores con composta y muestras plásticas

Según la norma ASTM D 5338-98 el frasco a utilizar en la experimentación no debe de ser llenado a más de $\frac{3}{4}$ de la capacidad del mismo, por lo cual, después de varios ensayos se determinó la cantidad de 227g de composta en base seca, esto porque como ya se ha mencionado la humedad óptima para que se tenga un buen proceso de compostaje es del 50%, por tanto, la cantidad pesada de composta fue de 454g base húmeda. Se agregaron 4g. de material plástico; los cuales fueron introducidos en cuadros de 1x1cm (ver figura 2.11) recordando que solo se le colocó de este material a 4 sistemas por réplica y uno de

los sistemas restantes fue usado como control positivo (celulosa+composta) y el otro como blanco (composta).



Figura 2.11. Reactores aerobios.

2.4 Monitoreo de parámetros y cuantificación de CO₂

Monitoreo de pH y humedad.

El monitoreo de pH y humedad se realizó in situ diariamente a los 24 reactores, ya que solo era para verificar cómo iba evolucionando el proceso, por lo cual el pH fue monitoreado diariamente durante la experimentación con medidor de pH-humedad del suelo marca TFA Germany; de igual manera la humedad se midió con un medidor de humedad Modelo MD812 (ver imagen 2.11), en el cual se observaba en el display el porcentaje de humedad contenida en la composta de cada reactor, de acuerdo al valor que arrojaba el medidor de humedad, se le agregaba agua destilada a los reactores para conservar una humedad óptima.



Figura 2.11 Medidor de pH y de humedad

Cuantificación de CO₂

La biodegradación del material se determinó a partir del CO₂ producido y los resultados obtenidos se compararon para obtener el porcentaje de biodegradación, con un material fácilmente biodegradable (celulosa) y con un blanco. Una vez establecidas las condiciones idóneas para el experimento se procedió a realizar los cálculos teóricos y las mediciones de CO₂ utilizando la siguiente metodología.

La medición de CO₂ producido en los reactores aerobios, se llevó a cabo mediante un proceso de titulación con HCl, utilizando fenolftaleína como indicador (vire de color rosa a incoloro). El procedimiento consistió en colocar tres frascos con capacidad de 1000mL conteniendo 700mL de NaOH en línea con los reactores (3 frascos por cada reactor, en total 72). Las mediciones se hicieron cada 24hrs durante 45 días para una de las cuatro réplicas de cada reactor. Para las tres réplicas restantes se tituló a las 48 y/o 72hrs en función de la concentración de CO₂ determinada. Se utilizó NaOH a una concentración 0.1N (para las titulaciones de 24hrs) y 0.5N (para las titulaciones de 48hrs y/o 72hrs).

Para realizar las mediciones, se retiraron los frascos con NaOH y se tomaron 3 alícuotas de 10mL de cada frasco y se colocaron en matraces Erlen Meyer, las cuales se titularon con HCl a una concentración de 0.2N (para las mediciones de 24hrs) y 1N (para las mediciones de 48 y/o 72hrs). Entre cada titulación el material de vidrio utilizado era lavado con agua destilada. Para cada medición (24, 48 y/o 72hrs) se cambiaron los frascos a titular por frascos con solución nueva de NaOH. El cambio de los frascos se debe realizar en un tiempo no mayor a 10 minutos. La concentración de CO₂ se calculó mediante la elaboración y programación de una hoja de EXCEL, en la cual se introducen las mediciones y se obtiene la concentración en moles de CO₂ calculada para cada reactor.

El HCl que se preparó fue estandarizado con una solución de tetraborato de sodio y utilizado para titular y estandarizar las soluciones de NaOH preparadas en cada cambio de frascos del sistema con el fin de conocer su concentración real.

Son varias las soluciones que se utilizan para obtener una solución estándar, las cuales tienen como base el uso de sustancias alcalinas de elevada pureza, las más usadas son carbonato de sodio y tetraborato de sodio (bórax) (Orozco, 1985). En éste caso se utilizó tetraborato de sodio, el cual tiene algunas ventajas sobre el carbonato de sodio, por mencionar algunas, el tetraborato de sodio tiene un peso equivalente muy superior al del carbonato de sodio: 53g en éste contra 190.7g en el tetraborato de sodio; esto es favorable por lo que respecta a la exactitud en las pesadas y además porque la influencia de pequeñas cantidades de impurezas es menor. Por otra parte, el bórax no es higroscópico, lo que permite conservarlo indefinidamente en el desecador sin aumento de peso y, además, las pesadas pueden hacerse sin peligro de que absorba humedad (Orozco, 1985).

La solución estándar de HCl fue elaborada mediante el método descrito en Orozco (1985), el cual consistió en lo siguiente:

Se realizó una sola pesada de bórax la cual se disolvió en un matraz volumétrico, se calculó la normalidad de la solución de bórax, y se relacionaron los volúmenes equivalentes de ésta solución con la solución de HCl.

Una vez que se tuvo la solución de bórax se tomaron 10mL por triplicado y se titularon con la solución de HCl de concentración desconocida, usando como indicador anaranjado de metilo.

La cuantificación de moles de CO₂ se llevó a cabo a partir de la siguiente ecuación.

$$\text{moles de } CO_2 = \frac{\text{moles de } NaOH - \text{moles de } HCl}{2}$$

3 Resultados y discusión.

3.1 Caracterización de la composta.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, la experimentación fue llevada a cabo de acuerdo al método de prueba de la ASTM-D-5338 para la determinación de biodegradación aerobia de materiales plásticos en condiciones controladas de composteo. El método de prueba ASTM-D-5338 establece un % de cenizas menor a 70, un pH entre 7 y 8.2, humedad entre 50 y 55% y una relación C/N entre 10 y 40. El sustrato utilizado para la prueba fue 100% composta madura (humus), % de cenizas de 52.63%, un pH de 8.95, y una relación C/N de 14.40 tal como lo marca el método de la ASTM-5338 a excepción de una pequeña variación en el valor de pH, la humedad fue de 39%, la cual fue ajustada a 50 % con la adición de agua destilada (ver tabla 3.1).

Tabla 3.1. Caracterización de la composta.

MO (%)	N (%)	C/N	MO*(%)	C/N*	pH	Humedad (%)
34.87	1.91	10.60	47.37	14.40	8.95	39

Los datos marcados con * representan los valores obtenidos partiendo de la determinación de cenizas de los cuales el MO*% fue utilizado para el cálculo de CO₂ teórico (ThCO₂); como se puede observar en la tabla 3.1 el valor correspondiente a MO* % es mayor a MO % al igual que el de C/N y C/N*, por consiguiente queda constatado lo que se menciona en SSL, (1995) acerca de que en la determinación de cenizas se obtienen valores más altos que con el método de Walkley y Black, esto debido a la volatilización de todas las formas de carbono orgánico presentes.

En el método ASTM-D-5338 se establecen diversas condiciones para llevar a cabo el proceso:

- *Se requiere el uso de un sistema de aireación libre de CO₂ a la entrada de los reactores.* En el apartado 4.1 se menciona que a la salida del aire de la bomba se colocó un frasco con solución de NaOH para cumplir esta condición.

- *El proceso deberá llevarse a cabo en un baño maría a 58°C y mantener la humedad entre 50 y 60 %.* El baño maría se mantuvo a una temperatura de $56^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, esto con el fin de evitar problemas de sobrecalentamiento de la instalación eléctrica. El mantener la humedad en las condiciones mencionadas resultó bastante complicado, debido a que el aire suministrado estaba seco, por lo cual éste arrastraba la humedad de la composta contenida en el reactor hacia las trampas de CO_2 a la salida del sistema. En consecuencia de la pérdida de humedad se tenía menor actividad microbiana y por ende afectaba a la producción de CO_2 , para contrarrestar este problema diariamente se agregaba cierta cantidad de agua destilada; la cantidad de agua destilada agregada se determinaba según la lectura que se obtuviera en el medidor de humedad.
- *El material a someter a biodegradación deberá de tener una superficie máxima de 2x2cm.* El material introducido en los reactores fue de 1x1cm.

En el anexo I y II se encuentra la manera en que se obtuvieron los resultados anteriormente presentados

3.2 Estimación de la cantidad de CO_2 teórica (ThCO_2)

En primera instancia, al observar las cantidades teóricas de CO_2 de las muestras plásticas mostradas en la tabla 3.2 podemos cometer el error de suponer mayor producción de CO_2 en el material que muestre un valor superior a los demás en la cantidad teórica de CO_2 , ya que esto solo nos da una pauta de la cantidad máxima de gas que el material puede producir en caso de biodegradarse al 100%, mas no cuál es el que se biodegradara en mayor cantidad; en este estudio se busca el efecto que tiene el aditivo pro-oxidante en el material polimérico (polietileno) para aumentar la degradación del mismo en el sistema de compostaje. En el siguiente apartado se muestran los resultados experimentales de dicha producción. En el anexo III se explica de qué manera se llegó a los resultados presentados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Estimación teórica de la producción de CO₂.

	ThCO ₂ (g)	ThCO ₂ (moles)
PeCo	1452.29	32.99
PeMn	1464.76	33.28
Pe s/a y ST	1466.37	33.31
Celulosa (papel bond)	1174.21	26.68

s/a: sin aditivo; ST: sin tratamiento.

3.3 Producción de CO₂ durante el proceso experimental

En la figura 3.1 se muestra la producción de CO₂ acumulada a partir del día 1 hasta el día 45. Donde se puede observar que la variación en la evolución de CO₂, de acuerdo a los sistemas, se hizo presente en el día 9, lo cual significa que la actividad microbiana tardó en estabilizarse este tiempo. Posterior a este tiempo la producción de CO₂ fue lograda de acuerdo a lo esperado: la celulosa (papel bond), la cual fue utilizada como control positivo, presentó mayor producción de CO₂ que el blanco (composta sola) y que los sustratos con muestra plástica a excepción del polietileno con aditivo de Mn (PeMn), esto se lo podemos atribuir a fugas existentes en los sistemas las cuales pudieron acrecentarse al momento de la manipulación de los mismos, a la hora de realizar el cambio de frascos que contenían la solución de NaOH.

A pesar de que al término de los 45 días, el material introducido (celulosa) en el reactor se podía apreciar casi sin daño, no podemos afirmar que no existió biodegradación, ya que en Rodríguez F., (2005) se menciona que existe degradación de la celulosa tanto en sistemas aeróbicos como en sistemas anaeróbicos, en especial se da la degradación por hongos por ser conocidos como agentes importantes en la degradación de materia orgánica en general y de sustratos celulósicos.

La única diferencia que existe entre los sistemas aeróbicos y anaeróbicos es la estrategia que utilizan los microorganismos en la degradación de esta; dependiendo el sistema en el que se desarrollen. De igual manera en la figura 3.1 se puede observar que en los últimos 6 días, la producción en polietileno termo-oxidado (PeTO) decreció, esto lo podemos atribuir, como ya se ha mencionado, al complejo control de la humedad, esto provoca la

desactivación de los microorganismos y por tanto la producción de CO₂. Por otro lado, como se mencionó en el apartado 1.4.1.1 la finalidad de los aditivos pro-oxidantes es fragmentar el material plástico con el objetivo de disminuir su peso molecular y así formar compuestos susceptibles a biodegradación y facilitar la asimilación de éste por los microorganismos. Al término de la prueba no se pudieron observar los cuadros de 1x1 cm introducidos al inicio de ésta, lo que se observó fueron pequeños fragmentos del material plástico insertados en algunos grumos de composta, esto se pudo observar a contraluz; por lo cual se puede corroborar que existió biodegradación y fragmentación de los materiales plásticos con los aditivos pro-oxidantes (PeCo y PeMn).

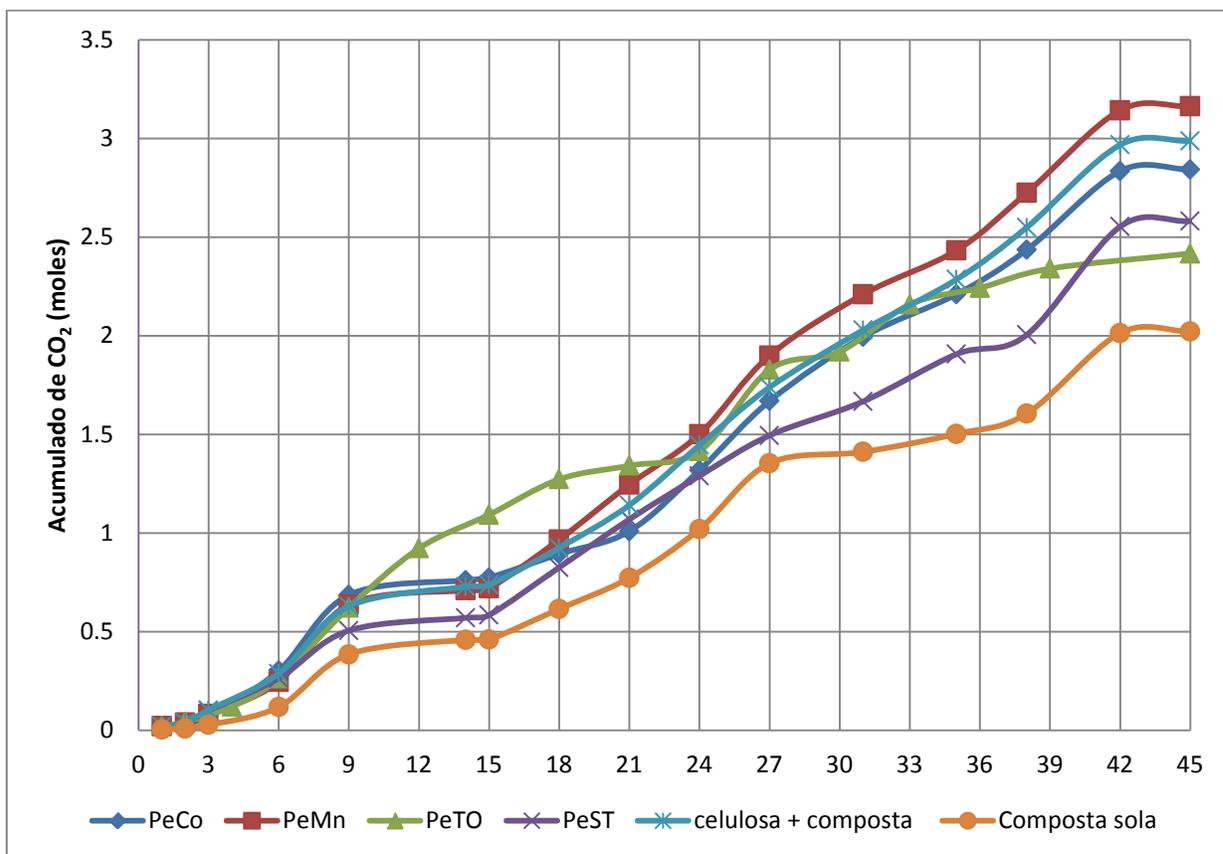


Figura 3.1. Producción acumulada de CO₂ en el proceso de compostaje en reactores aerobios con: película de polietileno con aditivo pro-oxidante de cobalto (PeCo), película de polietileno con aditivo pro-oxidante de manganeso (PeMn), película de polietileno sin aditivo termo-oxidado (PeTO), película de polietileno sin aditivo y sin tratamiento (PeST), papel bond (celulosa) y composta sola.

En el anexo IV se encuentra la producción de CO₂ durante los 45 días de la experimentación, así como la ecuación utilizada para obtener dicho valor.

3.4 Evaluación del porcentaje de biodegradación.

El porcentaje de biodegradación fue evaluado de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$biodegradación (\%) = \frac{(CO_2)_T - (CO_2)_B}{Th(CO_2)}$$

Dónde:

$(CO_2)_T$ =cantidad de CO₂ acumulada en cada reactor con la muestra plástica.

$(CO_2)_B$ = cantidad de CO₂ acumulada en el reactor blanco (composta sola)

$Th(CO_2)$ = cantidad de CO₂ teórica.

En la figura 3.2 se muestra el % de biodegradación durante los 45 días de experimentación.

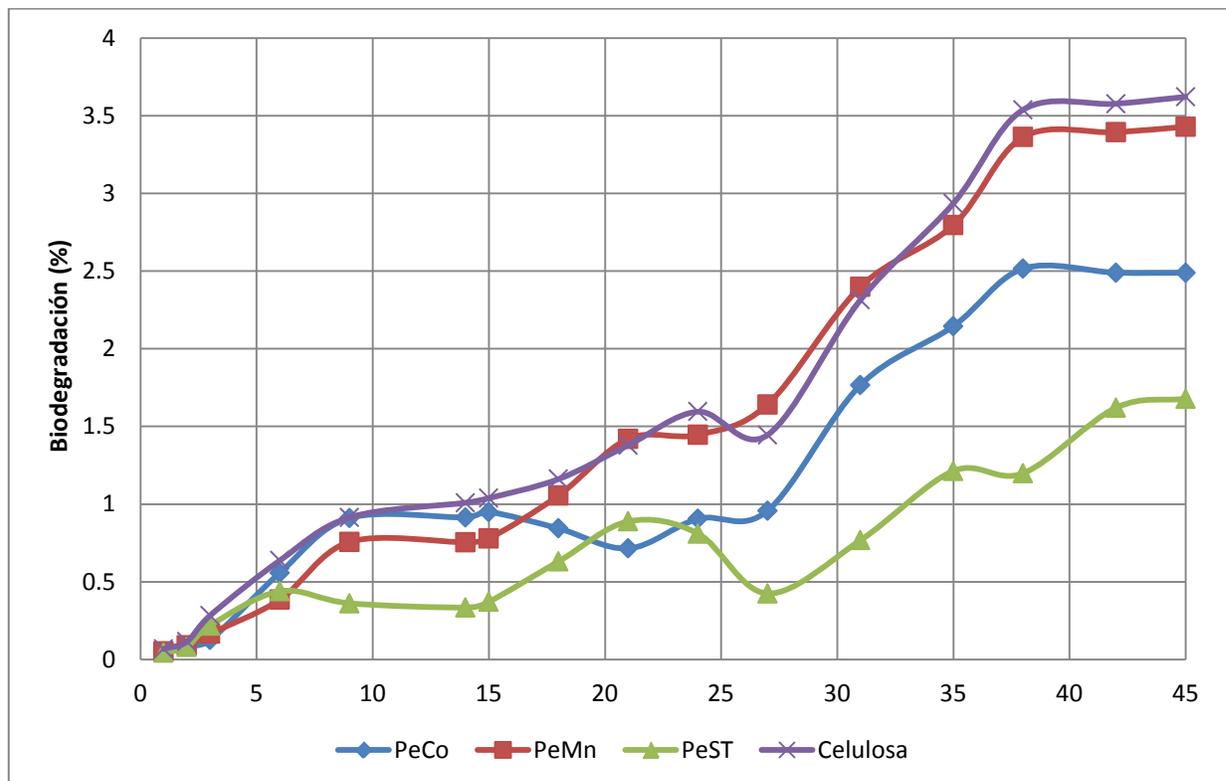


Figura 3.2. % Biodegradación de las muestras plásticas de película de polietileno con aditivo pro-oxidante de cobalto (PeCo), película de polietileno con aditivo pro-oxidante

de manganeso (PeMn), película de polietileno sin aditivo y sin tratamiento (PeST), en el proceso de compostaje en reactores aerobios.

En la figura 3.1 se muestra mayor producción de CO₂ en la película de polietileno con aditivo pro-oxidante de manganeso (PeMn) que en el de celulosa (papel bond), con se dedujo que el material de celulosa utilizado (papel bond) junto con la película de polietileno con aditivo pro-oxidante de manganeso presentaron los mayores porcentajes de biodegradación. En la figura 3.2 podemos constatar una vez más el funcionamiento de la celulosa (papel bond) como control positivo, a pesar de la diferencia que existió en la producción de CO₂ ya mencionada entre PeMn y celulosa, ésta última tuvo mayor porcentaje de biodegradación aún con las fugas que pudieron existir en los sistemas.

Por otra parte, se tiene el control negativo que fue el polietileno sin aditivo y sin tratamiento (PeST) el cual, como era de esperarse, tuvo el menor porcentaje de biodegradación que los materiales poliméricos con un aditivo pro-oxidante. Entre éstos últimos materiales mencionados, se puede observar en la tabla 3.3 que el PeMn presentó aproximadamente 50% mayor porcentaje de biodegradación que el PeCo. Es importante señalar que se deben considerar otros factores como el control de humedad para definir cuál de los dos aditivos es mejor. A los 45 días la experimentación realizada muestra que la película de polietileno con aditivo pro-oxidante de manganeso presentó mayor producción de CO₂, sin embargo, es necesario llevar a cabo mayor tiempo la evaluación para asegurar cual presentará mayor biodegradación y cuánto tiempo tardará en biodegradarse por completo.

En el anexo V se encuentra la manera en que se obtuvieron los valores presentados en la tabla 3.3, y la manera en que evoluciona el porcentaje de biodegradación a lo largo de la experimentación.

Tabla. 3.3. Biodegradación alcanzada hasta los 45 días de experimentación (%)

Sistema			
PeCo	PeMn	PeST	Celulosa
2.49	3.43	1.68	3.62

4 Conclusiones

El uso desmedido del empaque plástico, y la falta de supervisión para su reproceso han llevado a las bolsas de plástico a ser un peligro, no solo en México, si no que a nivel mundial.

Lamentablemente algunas acciones implementadas por los gobiernos no han sido del todo exitosas, por ejemplo, el agregarle un valor monetario a la bolsa para así disminuir su uso. Por lo cual las industrias del plástico han desarrollado materiales que tiene menores periodos de biodegradación que los convencionales, como lo es la bolsa de plástico aditivo pro-oxidante, mejor conocidas como “bolsa oxo-degradable”.

Esta experimentación, como ya se ha mencionado, fue realizada de acuerdo a la norma ASTM D5338-98, en la cual se da un método para evaluar la biodegradación de plásticos en composta, en función de la producción de CO₂. En este método se encontraron diversas desventajas:

- En el método no se asemejan a las condiciones reales de composteo en una planta de composta. En condiciones reales, la biodegradación ocurre en grandes pilas de composta, las cuales alcanzan la temperatura idónea de manera natural y no inducida como fue el caso del experimento, cabe señalar que el experimento es un proceso de compostaje acelerado de cómo podría comportarse el sistema en condiciones reales.
- El tiempo de un composteo real es de aproximadamente 4 a 6 meses, el cual no es equivalente a los 45 días de experimentación; a pesar de las condiciones controladas que se mantuvieron durante la experimentación existieron limitantes, como el manejo del sistema aireación, el complejo control de la humedad optima, el manejo de los sistemas receptores de CO₂ (frascos con NaOH).

Por otra parte la extensión del tiempo de experimentación no resulta viable, ya que esto implica gasto de reactivos y de energía eléctrica, lo cual resultaría una perdida no

necesaria, debido a que hablamos de un método prueba del cual no se puede conocer el tiempo real en el que tardaría una bolsa oxo-biodegradable en biodegradarse en condiciones reales de compostaje.

La factibilidad de la incorporación de las bolsas oxo-biodegradables puede ser viable desde el punto de vista que el contenido de un aditivo pro-oxidante en el plástico ayuda a fragmentar éste en partes pequeñas no visibles al ojo humano; pero no viable ya que el material polimérico seguirá siendo polietileno solo que distribuido entre los demás residuos, esto aunado a que la composta es utilizada como fertilizante, no se puede asegurar un buen funcionamiento como tal, o que causas negativas pudiera tener en la flora donde se utilice un tipo de composta que contenga una bolsa oxo-biodegradable en proceso de biodegradación.

No podemos asegurar que no se obtuvo nula biodegradación del material, ya que los datos experimentales arrojan lo contrario, aunque el porcentaje de biodegradación fue < al 10 %, la experimentación es válida, ya que se obtuvo mayor % de biodegradación en nuestro control positivo (material de celulosa) tal como se menciona en la norma ASTM D 5338. Así, podemos concluir que el aditivo pro-oxidante ayuda a la fragmentación del material, solo para reducir su volumen y por tanto su presencia a la vista de la población generadora de residuos.

7 Referencias bibliográficas.

- Alcántara L. (2009). *Un mal que dura 1000 años*. México D.F., El Universal. Consultado en mayo de 2013 en <http://www.eluniversal.com.mx/sociedad/2016.html>
- ASTM D5338-98, A. (2003). Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of plastics Materials under Controlled Composting Conditions. United States.
- Black Dog Publishing (2006), *Recycle, the essential guide*. Canada. pp. 119-129
- Cabildo M., Claramunt R., Corango M., Escólastico C., Esteban S., Farrán M. y otros (2008). *Reciclado y Tratamiento de Residuos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia Madrid, España.
- Corbella, R.; Fernández de Ullivarri, J. (2006). *Materia Orgánica del Suelo*. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- Costa, J.M. (2005). *Diccionario de Química Física*. Díaz Santos Ediciones, España.
- Diccionario de la Real Academia Española (DRAE) (2001), 22ª Edición
- Epstein, E. (2011). *Industrial composting, environmental engineering and facilities management*. CRC Press. USA.
- Hernández, Y. (2011), *Efectos de la degradación de las bolsas de plástico en suelo*. Director. Alethia Vázquez Morillas. Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería. México.
- Instituto Nacional de Ecología (2003), *La situación de los envases de plástico en México*. En *Gaceta Ecológica*, consultado en Mayo de 2013, en <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/>, pp. 67-70
- NMX-AA-024-1984, Determinación de Nitrógeno Total,
- NMX-AA-021-1985, Determinación de Materia Orgánica.
- NMX-AA-067-1985, Determinación de la relación Carbono/Nitrógeno.
- NMX-AA-025-1984, Determinación de pH, Método Potenciométrico.
- NMX-AA-016-1984, Determinación de Humedad.
- NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras

complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

- Orozco F. (1985). *Análisis Químico Cuantitativo*. Ed. Porrúa. 16° Edición, México, p. 207-210.
- Quiroz, F. (2009). *Estudio de la degradación de polímeros oxo-biodegradables*. Revista Politécnica. Vol. 30. Núm. 1. p. 179-191.
- Rodríguez, F (2005). *Biotecnología Ambiental*. Editorial Tébar. Madrid.
- SAGARPA (2010). *Elaboración de Composta*. Consultado en mayo de 2013, de <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Elaboraci%C3%B3n%20de%20Composta.pdf>
- SEMARNAT (2001). *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales*. México, D.F. SEMARNAT.
- SEMARNAT-a (2006). *Manual de compostaje. Tratamiento de Residuos Sólidos*, México D.F.
- SEMARNAT-b (2009). *Estudio comparativo e las bolsas de plástico degradables versus convencionales mediante la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida*.
- SEMARNAT-c (2012). *Informe de la Situación de Medio Ambiente en México*. México, D.F. SEMARNAT. pp. 318-330
- SMADF (2013), *Programas generales, Residuos sólidos*. Consultado en Agosto de 2013 de: <http://www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/temas-ambientales/programas-generales/103-residuos-solidos>,
- Soil Survey Laboratory [SSL] (1995). *Information manual. Soil Survey Investigations Nº 45. Version 1.0*. E.E.U.U. United States Department of Agriculture (USDA).
- Tchobanoglous G. (1999), *Gestión Integral de Residuos Sólidos Vol. 2*, Mc Graw Hill, España.

Anexos.

Anexo I

Ecuación para la determinación de materia orgánica.

$$MO(\%) = \frac{(V_1N_1 - VNF)K}{M}$$

Dónde:

V_1 = Volumen de la solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) empleado en la muestra en mL.

N_1 = Normalidad de la solución de $K_2Cr_2O_7$.

V = Volumen de la solución de sulfato ferroso ($FeSO_4$) gastado en la titulación de la muestra en mL.

N = Normalidad de la solución de $FeSO_4$.

M = Peso de la muestra en g.

$K = 0.69$

F = Factor de recuperación que se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$F = \frac{V_0N_1}{V_BN}$$

Dónde:

V_0 = Volumen de solución de $K_2Cr_2O_7$ empleado en el blanco en mL.

V_B = Volumen de $FeSO_4$ gastado en la titulación del blanco en mL.

Tabla 1. Resultados de Materia Orgánica del sustrato inicial (composta) y de compostas finales.

Muestra	Replica	M (g)	V (mL) FeSO ₄	F	%M.O.	Promedio
Inicial						
Composta	1	0.1029	6.7	1.31631712	37.51237	34.8740311
	2	0.1065	7.4		33.25952	
	3	0.1033	7.5		33.85021	
Blanco			15.2			
Compostas finales						
PeCo	1	0.1125	6.5	1.22365222	37.17989	35.6952957
	2	0.1172	6.7		34.96790	
	3	0.1173	6.7		34.93809	
Blanco			16.4			
PeMn	1	0.1154	7	1.30311335	32.75081	32.6652724
	2	0.115	7.1		32.47348	
	3	0.1167	6.9		32.77153	

Blanco			15.4			
PeTO	1	0.1128	6.7	1.21381243	36.50579	37.2760955
	2	0.1085	6.8		37.56529	
	3	0.1124	6.4		37.75720	
Blanco			16.5			
PeST	1	0.1114	6.8	1.17122252	37.48734	36.4589
	2	0.119	6.8		35.09319	
	3	0.1179	6.4		36.79617	
Blanco			17.1			
Composta	1	0.1385	5.2	1.24007053	33.47668	34.342149
	2	0.1394	5		33.88811	
	3	0.1386	4.5		35.66166	
Blanco			15.8			
Celulosa +Composta	1	0.1213	5.2	1.24400725	38.69566	41.6583149
	2	0.1033	5		46.27213	
	3	0.1184	5.1		40.00716	
Blanco			15.75			

Tabla 2. Soluciones utilizadas para la determinación de MO%

Composta inicial		PeCo y PeMn	
mL $K_2Cr_2O_7$	10	mL $K_2Cr_2O_7$	10
N ($K_2Cr_2O_7$)	1.000381	N ($K_2Cr_2O_7$)	1.0042
N ($FeSO_4$)	0.49999	N ($FeSO_4$)	0.5004
PeTO y PeST		Composta y celulosa +composta	
mL dicromato.	10	mL dicromato.	10
N ($K_2Cr_2O_7$)	1.0048	N ($K_2Cr_2O_7$)	1.0016
N ($FeSO_4$)	0.5017	N ($FeSO_4$)	0.5112

La Normalidad del $K_2Cr_2O_7$ y $FeSO_4$ están dadas de acuerdo a la cantidad exacta pesada al momento de preparar las soluciones. La solución de $K_2Cr_2O_7$ y $FeSO_4$ fueron preparadas en cantidades necesarias y al momento de llevar a cabo la determinación de MO% Esto porque se realizaron ensayos previos, los cuales mostraron gran variación en los resultados al dejar una solución de $K_2Cr_2O_7$ y $FeSO_4$ para utilizarlos el día siguiente.

Anexo II

Ecuación para calcular el porcentaje de Nitrógeno total.

$$N(\%) = \frac{[(A)(N_1) - (B)(N_2)][0.014]}{M} \times 100$$

Dónde:

A = volumen de la solución de H₂SO₄ empleado en la recolección del amoniaco destilado.

N₁ = Normalidad del H₂SO₄.

B = Volumen de la solución de NaOH empleado en la neutralización de la solución de H₂SO₄.

N₂ = Normalidad de la solución de NaOH,

M = Masa de la muestra en g.

0.014 = Miliequivalente de nitrógeno

Tabla 3. Resultados de Nitrógeno Total del sustrato inicial y sustratos finales del proceso de compostaje en reactores aerobios.

Muestra	Replica	M (g)	V (mL) NaOH gastados	%N	Promedio
Inicial					
Composta	1	1.0987	7.2	1.92358	1.90847242
	2	1.0194	8.3	1.91913	
	3	1.0998	7.5	1.88271	
Compostas Finales.					
PeCo	1	1.0291	1	2.31637	2.47301531
	2	1.0884	5.7*	2.75960	
	3	1.029	0.8	2.34307	
PeMn	1	1.0254	3.2*	3.26126	3.20109291
	2	1.0333	3.5*	3.19678	
	3	1.0459	3.6*	3.14524	
PeTO	1	1.0061	6.8*	2.83640	2.84619406
	2	1.0157	6.2*	2.89006	
	3	1.0051	7*	2.81212	
PeST	1	1.002	4.6	1.88961	1.86262871
	2	1.0351	4.5	1.84234	
	3	1.0422	4.3	1.85593	
Composta	1	0.9841	5.5	1.79940	1.48799228
	2	1.0015	11.5	0.95204	
	3	1.0022	5.9	1.71253	

Celulosa +Composta	1	1.0096	8.3	1.37616	1.33090077
	2	1.0858	8.8	1.21686	
	3	1.0121	8.1	1.39968	

Tabla 4. Soluciones utilizadas para la determinación de N%

Composta inicial		PeCo y PeMn	
A, H ₂ SO ₄ (mL)	25	A, H ₂ SO ₄ (mL)	20
N H ₂ SO ₄	0.08976	N H ₂ SO ₄	0.09
N NaOH	0.102	N NaOH	0.0973
PeTO y PeST		Composta y celulosa +composta	
A(mL)	20	A(mL)	20
N H ₂ SO ₄	0.09	N H ₂ SO ₄	0.0998
N NaOH	0.0973	N NaOH	0.0973

* El volumen de H₂SO₄ empleado en la recolección (A) fue de 30 ml, debido que en el proceso del destilado, el indicador viraba antes de ser evaluado mediante la titulación con NaOH.

Anexo III

Calculo para la determinación de ThCO₂

La estimación de CO₂ teórico se llevó a cabo a partir de la siguiente ecuación.

$$ThCO_2 = M_{TOT} \times C_{TOT} \times \frac{44}{12}$$

Donde.

ThCO₂ = cantidad teórica de CO₂ que puede ser producida por la muestra de plástico, g/reactor.

M_{TOT} = total de solidos seco, g. en el plástico agregado en los reactores al inicio de la experimentación.

C_{TOT} = proporción de carbono orgánico total en el total de los sólidos secos en la muestra de plástico g/g.

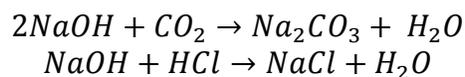
44 y 12 masa molecular de CO₂ y masa atómica del carbono respectivamente.

Tabla 5. Resultados ThCO₂ de cada material utilizado en la experimentación.

ThCO ₂ Composta						
Cenizas (%)	C _{TOT} (g C/g ms)	M _{TOT} (g)	ThCO ₂ (g)	ThCO ₂ (moles)	moles 45 días	Biodegradación (%)
52.63	47.37	300	52107	1183.98	2.02	
ThCO ₂ PeCo						
Cenizas (%)	C _{TOT} (g C/g ms)	M _{TOT} (g)	ThCO ₂ (g)	ThCO ₂ (moles)	moles 45 días	Biodegradación (%)
0.98	99.02	4	1452.29	33.00	2.84	2.489
ThCO ₂ PeMn						
Cenizas (%)	C _{TOT} (g C/g ms)	M _{TOT} (g)	ThCO ₂ (g)	ThCO ₂ (moles)	moles 45 días	Biodegradación (%)
0.13	99.87	4	1464.76	33.28	3.16	3.429
ThCO ₂ Pe s/a						
Cenizas (%)	C _{TOT} (g C/g ms)	M _{TOT} (g)	ThCO ₂ (g)	ThCO ₂ (moles)	moles 45 días	Biodegradación (%)
0.02	99.98	4	1466.37	33.32	2.58	1.679
ThCO ₂ Papel						
Cenizas (%)	C _{TOT} (g C/g ms)	M _{TOT} (g)	ThCO ₂ (g)	ThCO ₂ (moles)	moles 45 días	Biodegradación (%)
19.94	80.06	4	1174.21	26.68	2.99	3.621

Anexo IV

Calculo para la determinación de CO₂.



$$\text{moles de CO}_2 = \frac{\text{moles de NaOH}_0 - \text{moles de HCl}}{2}$$

$$\text{moles de NaOH}_0 = [\text{NaOH}]_0 \times V_{\text{alicuota}}$$

$$\text{moles de HCl} = [\text{HCl}] \times V_{\text{gastado}}$$

Dónde:

$[\text{NaOH}]_0$ = Concentración inicial de NaOH, mol/L.

V_{alicuota} = volumen alícuota = 0.01, L.

$[\text{HCl}]$ = Concentración de HCl, mol/L.

V_{gastado} = Volumen de HCl gastado en la titulación, L

El resultado dado representa la cantidad de CO₂ en la alícuota de 10 mL, por lo cual se trasladara a los 700 ml contenidos en los frascos de NaOH, con una simple regla de tres.

$$\text{moles de CO}_2 / 700 \text{ mL} = \frac{700 \text{ mL} \times \text{moles de CO}_2 / 10 \text{ mL}}{10 \text{ mL}}$$

En la Tabla 5 y Tabla 6 se muestra la producción de CO₂ durante los 45 días de experimentación.

Anexo V

Calculo del porcentaje de Biodegradación.

El porcentaje de biodegradación fue evaluado de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\text{biodegradación (\%)} = \frac{(CO_2)_T - (CO_2)_B}{Th(CO_2)}$$

Dónde:

$(CO_2)_T$ = cantidad de CO_2 acumulada en cada reactor con la muestra plástica.

$(CO_2)_B$ = cantidad de CO_2 acumulada en el reactor blanco (composta sola)

$Th(CO_2)$ = Cantidad de CO_2 teórica.

En la figura 5.2 se muestra el % de biodegradación durante los 45 días de experimentación.

En la tabla 7 se muestran los datos de porcentaje de biodegradación.

Tabla 5. Producción de CO₂ acumulado en los sistemas del día 1 al 18.

Sistema	Fecha	04-sep	05-sep	06-sep	09-sep	12-sep	17-sep	18-sep	21-sep
300 g composta+ 4 g PeCo	Día	1	2	3	6	9	14	15	18
	ml HCl F1	0.8	0.8	4.4	4.4	3.4	2.5	3.0	2.8
	ml HCl F2	0.7	2.0	5.1	6.1	5.0	2.8	4.0	3.6
	ml HCl F3	0.4	1.2	8.0	11.1	5.7	4.1	4.7	4.2
	[HCl]	0.052	0.052	0.099	0.2828	0.394	0.44	0.197	1
	[NaOH]	0.023	0.023	0.087	0.426	0.55	0.208	0.0882	0.47
	CO2 total	0.0208	0.0167	0.0307	0.2335	0.3835	0.0749	0.0130	0.1202
	CO2 acumulado	0.0208	0.0375	0.0682	0.3017	0.6852	0.7601	0.7731	0.8933
300 g composta+ 4 g PeMn	ml HCl F1	0.6	0.8	4.5	6.7	5.7	6.9	4.0	1.7
	ml HCl F2	0.6	2.0	4.8	10.1	4.1	10.7	4.2	2.6
	ml HCl F3	0.5	1.2	4.6	11.9	3.7	9.7	4.4	2.8
	[HCl]	0.052	0.052	0.099	0.2828	0.394	0.44	0.197	1
	[NaOH]	0.023	0.023	0.087	0.426	0.55	0.467	0.0882	0.47
	CO2 total	0.0210	0.0180	0.0434	0.1634	0.3909	0.0728	0.0095	0.2473
	CO2 acumulado	0.0210	0.0390	0.0823	0.2457	0.6366	0.7094	0.7189	0.9662
300 g composta+ 4 g PeTO	ml HCl F1	1.0	1.0	0.8	5.7	6.6	3.7	3.8	5.9
	ml HCl F2	0.6	0.6	1.0	5.1	4.3	5.1	5.2	7.0
	ml HCl F3	0.5	0.5	0.9	7.1	6.6	5.4	6.1	7.2
	[HCl]	0.052	0.052	0.099	0.2828	0.394	0.384	0.44	0.5
	[NaOH]	0.024	0.024	0.082	0.305	0.571	0.467	0.4416	0.507
	CO2 total	0.0214	0.0214	0.0770	0.1429	0.3591	0.3002	0.1705	0.1794
	CO2 acumulado	0.0214	0.0428	0.1198	0.2627	0.6218	0.9220	1.0925	1.2720
300 g composta+ 4 g PeST	ml HCl F1	1.8	0.6	2.5	0.1	7.2	2.6	3.2	1.9
	ml HCl F2	0.8	0.5	2.8	0.1	7.4	3.0	4.2	2.4
	ml HCl F3	0.7	2.5	2.6	11.5	9.8	4.4	4.6	2.8
	[HCl]	0.052	0.052	0.099	0.2828	0.394	0.44	0.197	1

	[NaOH]	0.023	0.023	0.087	0.426	0.55	0.208	0.092	0.47
	CO2 total	0.0180	0.0177	0.0641	0.1641	0.2415	0.0644	0.0139	0.2415
	CO2 acumulado	0.0180	0.0357	0.0998	0.2639	0.5054	0.5698	0.5836	0.8251
300 g composta+ 4 g Celulosa	ml HCl F1	0.5	2.7	2.3	8.6	3.8	7.1	3.7	2.5
	ml HCl F2	0.5	0.5	3.0	7.5	6.3	8.4	4.0	2.9
	ml HCl F3	0.3	0.5	2.8	10.4	7.1	10.0	4.4	3.3
	[HCl]	0.052	0.052	0.099	0.2828	0.394	0.44	0.197	1
	[NaOH]	0.023	0.023	0.087	0.426	0.55	0.208	0.092	0.47
	CO2 total	0.0217	0.0175	0.0633	0.1850	0.3412	0.0987	0.0094	0.1878
	CO2 acumulado	0.0217	0.0393	0.1025	0.2875	0.6288	0.7275	0.7369	0.9247
300 g composta	ml HCl F1	3.8	3.6	6.5	11.4	6.3	7.6	4.3	2.8
	ml HCl F2	3.7	3.4	7.1	12.0	8.0	9.4	4.9	3.3
	ml HCl F3	3.8	3.5	7.5	12.6	8.2	10.1	5.0	3.5
	[HCl]	0.052	0.052	0.099	0.2828	0.394	0.44	0.197	1
	[NaOH]	0.023	0.023	0.087	0.426	0.55	0.208	0.092	0.47
	CO2 total	0.0035	0.0052	0.0182	0.0906	0.2672	0.0735	0.0015	0.1552
	CO2 acumulado	0.0035	0.0087	0.0269	0.1175	0.3847	0.4583	0.4597	0.6149

Tabla 6. Producción de CO₂ acumulado en los sistemas del día 21 al 45.

Sistema	Fecha	24-sep	27-sep	30-sep	04-oct	08-oct	11-oct	15-oct	18-oct
300 g composta+ 4 g PeCo	Día	21	24	27	31	35	38	42	45
	ml HCl F1	2.5	2.0	2.3	1.6	2.4	1.7	2.1	0.8
	ml HCl F2	3.1	2.3	2.8	2.3	3.5	2.1	3.0	0.9
	ml HCl F3	3.5	2.9	2.8	2.5	3.8	2.7	2.8	1.0
	[HCl]	1.3500	1.35	0.979	1.224	1.224	1.224	1.469	1.469
	[NaOH]	0.521	0.617	0.594	0.5727	0.5997	0.4773	0.7674	0.139
	CO2 total	0.1155	0.3092	0.3507	0.3250	0.2163	0.2248	0.3996	0.0082
	CO2 acumulado	1.0088	1.3180	1.6687	1.9937	2.2100	2.4349	2.8345	2.8426
300 g composta+ 4 g PeMn	ml HCl F1	1.6	2.0	1.9	1.8	2.7	1.2	2.2	0.7
	ml HCl F2	1.9	2.9	2.1	2.2	3.2	1.6	2.7	0.8
	ml HCl F3	2.2	3.4	2.5	2.8	3.6	2.1	2.6	1.0
	[HCl]	1.35	1.35	0.979	1.224	1.224	1.224	1.469	1.469
	[NaOH]	0.521	0.617	0.594	0.5727	0.5997	0.4773	0.7674	0.139
	CO2 total	0.2793	0.2549	0.3987	0.3100	0.2234	0.2912	0.4184	0.0202
	CO2 acumulado	1.2455	1.5004	1.8991	2.2091	2.4326	2.7238	3.1423	3.1624
300 g composta+ 4 g PeTO	ml HCl F1	4.6	4.7	2.5	6.1	4.8	4.2	1.8	2.1
	ml HCl F2	5.1	5.3	3.1	7.3	5.1	5.1	1.9	2.0
	ml HCl F3	5.3	5.4	3.0	7.9	5.9	5.2	2.3	2.1
	[HCl]	1	1.35	0.979	0.979	1.224	1.224	1.224	0.287
	[NaOH]	0.566	0.763	0.675	0.7832	0.8727	0.6732	0.3386	0.132
	CO2 total	0.0693	0.0735	0.4129	0.0914	0.2395	0.0835	0.0978	0.0767
	CO2 acumulado	1.3413	1.4148	1.8277	1.9191	2.1585	2.2421	2.3399	2.4165
300 g composta+ 4 g PeST	ml HCl F1	1.7	2.7	4.0	2.4	2.3	2.4	1.7	0.8
	ml HCl F2	2.3	3.1	4.4	3.9	3.3	3.2	1.4	0.7

	ml HCl F3	2.4	3.2	3.8	3.8	3.5	3.8	1.9	0.8
	[HCl]	1.3500	1.35	0.979	1.224	1.224	1.224	1.469	1.469
	[NaOH]	0.521	0.617	0.594	0.5727	0.5997	0.4773	0.7674	0.139
	CO2 total	0.2439	0.2202	0.2051	0.1722	0.2398	0.0978	0.5487	0.0277
	CO2 acumulado	1.0690	1.2892	1.4943	1.6666	1.9064	2.0041	2.5528	2.5805
300 g composta+ 4 g Celulosa	ml HCl F1	2.2	2.5	2.6	2.3	2.5	2.1	2.4	0.7
	ml HCl F2	2.3	2.3	3.0	2.4	3.1	1.7	2.5	0.8
	ml HCl F3	2.5	2.5	4.0	2.5	3.2	1.8	2.7	1.0
	[HCl]	1.3500	1.35	0.979	1.224	1.224	1.224	1.469	1.469
	[NaOH]	0.521	0.617	0.594	0.5727	0.5997	0.4773	0.7674	0.139
	CO2 total	0.2163	0.3037	0.2936	0.2900	0.2570	0.2634	0.4184	0.0202
	CO2 acumulado	1.1410	1.4447	1.7383	2.0284	2.2853	2.5487	2.9672	2.9874
300 g composta	ml HCl F1	2.5	2.8	2.9	4.2	4.1	2.8	2.4	1.0
	ml HCl F2	2.8	2.8	2.8	3.9	4.1	2.8	2.7	1.0
	ml HCl F3	2.9	2.8	2.8	4.6	4.4	3.6	2.7	1.0
	[HCl]	1.3500	1.35	0.979	1.224	1.224	1.224	1.469	1.469
	[NaOH]	0.521	0.617	0.594	0.5727	0.5997	0.4773	0.7674	0.139
	CO2 total	0.1580	0.2462	0.3336	0.0580	0.0913	0.1028	0.4082	0.0083
	CO2 acumulado	0.7729	1.0191	1.3527	1.4107	1.5020	1.6048	2.0129	2.0212

Tabla 7. % Biodegradación en el proceso de compostaje en reactores aerobios.

Dia	CO2 Acumulado					%Biodegradacion			
	Composta	PeCo	PeMn	PeST	Celulosa	PeCo	PeMn	PeST	Celulosa
1	0.003523333	0.020752667	0.020965	0.0179984	0.021723333	0.05221142	0.05240502	0.04344376	0.06821435
2	0.00868467	0.037501333	0.03898767	0.03571773	0.03926067	0.08732544	0.09104802	0.08113386	0.11460011
3	0.02686542	0.068156083	0.08234742	0.09980973	0.10254417	0.12512639	0.16670054	0.21892647	0.28364708
6	0.11750748	0.301659283	0.24573978	0.26389183	0.28754717	0.55804985	0.3852852	0.43934073	0.63731575
9	0.38473248	0.68517995	0.63661512	0.5053755	0.6287785	0.91046986	0.75680348	0.36208372	0.91469454
14	0.45825582	0.760103283	0.70941512	0.5697755	0.72745517	0.91471239	0.75463016	0.33470203	1.00897027
15	0.45970715	0.773118617	0.71890828	0.5836355	0.7368655	0.9497557	0.77879256	0.37194394	1.03880093
18	0.61487382	0.893285283	0.96624162	0.8251355	0.92469883	0.84369241	1.0557154	0.63105462	1.16123694
21	0.77289882	1.008785283	1.24554162	1.068998	1.14099883	0.71482552	1.42009678	0.88867717	1.37965404
24	1.01912382	1.318010283	1.50042912	1.2892355	1.44471133	0.90573943	1.44612402	0.81068135	1.59511956
27	1.35271348	1.66873245	1.89912228	1.49433142	1.73832517	0.95765741	1.6417332	0.42503536	1.44528849
31	1.41069448	1.99374945	2.20914528	1.66655242	2.02835617	1.76687784	2.39901552	0.76790183	2.31502146
35	1.50202348	2.21002845	2.43256428	1.90639342	2.28533317	2.14552376	2.79589152	1.21362823	2.935877
38	1.60477648	2.43487545	2.72381328	2.00414842	2.54873617	2.51551492	3.3622443	1.19862782	3.53799982
42	2.01293715	2.83446695	3.14225695	2.55284342	2.96717983	2.4895471	3.39314047	1.620411	3.57654093
45	2.02123215	2.842647617	3.16243445	2.58053892	2.98735733	2.48920062	3.42884249	1.67863737	3.62107703
ThCO2		32.9991669	33.2824358	33.3190941	26.6806029				