



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE BOLSAS DE PLÁSTICO ETIQUETADAS COMO
COMPOSTABLES EN RELLENOS SANITARIOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MITZY JOSEFINA LÓPEZ LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL
M.C. GUTIÉRREZ PALACIOS CONSTANTINO, FACULTAD DE INGENIERÍA, U.N.A.M.
COMITÉ TUTOR
DRA. GÜERECÁ HERNÁNDEZ LEONOR PATRICIA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, U.N.A.M.
DRA. ORTA LEDESMA MARÍA TERESA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, U.N.A.M.
DRA. VÁZQUEZ MORILLAS ALETHIA, U.A.M. AZCAPOTZALCO
DRA. DEL VALLE PÉREZ PAULINA, FACULTAD DE QUÍMICA, U.N.A.M.

CD. MX. SEPTIEMBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

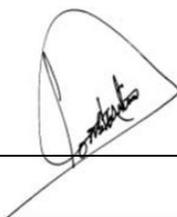
JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Vázquez Morillas Alethia
Secretario: Dra. Del Valle Pérez Paulina
1 er. Vocal: Dra. Güereca Hernández Leonor Patricia
2 do. Vocal: Dra. Orta Ledesma María Teresa
3 er. Vocal: M. C. Gutiérrez Palacios Constantino

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Posgrado de Ingeniería U.N.A.M.

TUTOR DE TESIS:

M.C. Constantino Gutiérrez Palacios



Contenido

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA	1
RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Planteamiento del problema.....	7
1.2. Justificación	9
1.3. Objetivos.....	10
1.3.1. General.....	10
1.3.2. Particulares	10
1.4. Alcances y limitaciones	10
2. ANTECEDENTES	12
2.1. Breve historia de los plásticos	12
2.2. Marco Teórico.....	13
2.2.1. Polímeros	13
2.2.2. Plásticos	15
2.3. Fabricación de bolsas plásticas	16
2.4. Situación actual.....	18
2.4.1. Políticas y acciones.....	19
2.4.2. Degradabilidad.....	23
2.5. Otras alternativas: plásticos compostables.....	24
2.5.1. Materiales utilizados en la elaboración de bolsas compostables	25
2.5.2. Normatividad vigente	27
2.5.3. Trabajos destacables sobre bolsas compostables en rellenos sanitarios.....	28
3. METODOLOGÍA.....	30
4. DISEÑO DEL EXPERIMENTO	35
4.1. Fase 1, recolección de bolsas de plástico etiquetadas como compostables	35
4.2. Fase 2, revisión, limpieza y mantenimiento de los lisímetros:	37

4.3. Fase 3, propiedades físicas y mecánicas de las bolsas etiquetadas como compostables	40
4.3.1. Propiedades mecánicas	40
4.3.2. Características macro y microscópicas	41
4.3.3. Rendimiento másico	42
4.3.4. Análisis por Espectroscopía de Infrarrojo (IR).....	43
4.4. Fase 4, recolección de residuos sólidos urbanos.....	44
4.5. Fase 5, montaje de modelos físicos (lisímetros)	44
4.5.1. Cálculo de los residuos que serán dispuestos en los lisímetros	45
4.5.2. Recolección de los RSU y montaje del experimento	48
4.6. Fase 6, propiedades químicas de los lixiviados generados en los lisímetros.....	53
5. RESULTADOS	55
5.1. Pruebas preliminares.....	55
5.1.1. Análisis por Espectroscopía de IR.....	55
5.1.2. Características macro y microscópicas.....	60
5.1.3. Rendimiento másico	63
5.1.4. Propiedades mecánicas	64
5.1.5. Estimación teórica de lixiviados.....	66
5.2. Resultados del mes 1 de observación	71
5.2.1. Análisis por Espectroscopía de IR.....	71
5.2.2. Características macro y microscópicas.....	73
5.2.3. Rendimiento másico	76
5.2.4. Resultados de los análisis a los lixiviados.....	78
5.3. Resultados del mes 2 de observación	79
5.3.1. Análisis por Espectroscopía de IR.....	79
5.3.2. Características macroscópicas	81
5.3.3. Rendimiento másico	83
5.3.4. Resultados de los análisis a los lixiviados.....	84
5.4. Resultados del mes 3 de observación	86
5.4.1. Análisis por Espectroscopía de IR.....	86
5.4.2. Características macroscópicas	88

5.4.3.	Rendimiento másico	90
5.4.4.	Resultados de los análisis a los lixiviados	91
5.5.	Resultados del mes 4 de observación	92
5.5.1.	Análisis por Espectroscopía de IR.....	92
5.5.2.	Características macro y microscópicas.....	94
5.5.3.	Rendimiento másico	98
5.5.4.	Resultados de los análisis a los lixiviados	99
5.6.	Resultados del mes 5 de observación	100
5.6.1.	Análisis por Espectroscopía de IR.....	100
5.6.2.	Características macroscópicas	102
5.6.3.	Rendimiento másico	103
5.6.4.	Resultados de los análisis a los lixiviados	104
5.7.	Resultados del mes 6 de observación	105
5.7.1.	Análisis por Espectroscopía de IR.....	105
5.7.2.	Características macro y microscópicas.....	108
5.7.3.	Rendimiento másico	111
5.7.4.	Propiedades mecánicas	113
5.7.5.	Resultados de los análisis a los lixiviados	116
6.	DISCUSIÓN.....	118
7.	CONCLUSIONES.....	122
	REFERENCIAS	125
	ANEXOS	133
	Anexo A.....	133
	Anexo A.....	134
	Anexo B.....	135
	Anexo B.....	136
	Anexo C.....	137
8.3.	Anexo C.....	138

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, ya que sin Él nada de esto podría ser posible, por permitirme llegar hasta este punto de mi vida, por las oportunidades que me ha abierto, por las personas que puso en mi camino, por todo lo que tengo y he logrado, por un éxito más que he alcanzado.

A mis padres, que sin ellos no hubiera podido continuar en este camino del enriquecimiento intelectual, por su apoyo incondicional en cada una de las cosas que quiero hacer, porque son mi motor, mi fuerza, porque gracias a ellos soy la mujer que soy y porque nunca se han cansado de demostrarme lo mucho que me quieren y lo orgullosos que están de mí. Gracias Mario y Carmen por construir y preservar el hogar más hermoso que pudiera alguien soñar, sin duda soy muy afortunada de ser su hija, son mi ejemplo para seguir adelante, los amo.

A mis hermanos porque su apoyo ha sido un constante en mi vida, porque creen en mí y en cada una de las cosas que quiero emprender, porque no se cansan de decirme lo felices y orgullosos que están de mí y de todo lo que he logrado, porque son un ejemplo de todo lo que quiero ser en la vida y porque simplemente soy muy afortunada de tenerlos, así que, Ivette, Mario y Liss, esto también es gracias a ustedes, los amo mucho hermanos.

A mis amigos, tanto los de la licenciatura como los que tuve el gusto de conocer en este posgrado, porque sin duda son el tipo de personas que quieres tener y preservar en tu vida siempre, personas que te ven crecer, te apoyan, se enorgullecen de ti y de tus logros, te escuchan y que en pocas palabras siempre están para ti, agradezco infinitamente su llegada y presencia en mi vida, gracias Etzy, Eugenio, Alexandra, Andrea V., Mich, Samanta, Gaby, Andrea D., Amelia, Nadia y Mario, gracias por su amistad, cariño y por todo lo que me han enseñado, son personas increíbles y me siento sumamente bendecida por tenerlos en mi vida.

A Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca de posgrado que me otorgó en estos dos años de maestría, porque sin ese apoyo no habría podido culminar este nivel de estudios tan importante y que me llena completamente de orgullo y satisfacción.

Al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP) por otorgarme el sustento para poder realizar mi estancia en la Brandenburgische Technische Universität (BTU) de Cottbus Alemania, una experiencia que sin duda me ha brindado nuevas aptitudes para el campo laboral.

A todos y cada uno de los técnicos académicos, profesores, laboratoristas y personal encargado de los equipos que utilicé a lo largo de mi experimentación, en especial, a la Dra.

Paulina del Valle y al Mtro. Abel Hernández de la Facultad de Química de la UNAM por su apoyo en el uso del espectrofotómetro de IR, al Dr. Antonio Sánchez Solís y al M. en C. Eliezer Hernández Mecinas del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, por su valiosa ayuda en la determinación de las propiedades mecánicas de las muestras analizadas para esta tesis. Por otro lado, agradecer al Mtro. Jorge Luis Romero Hernández, al Biol. Germán Álvarez Lozano y al M. en I. Efraín Ramos Trejo del Laboratorio de Microscopía Electrónica de la DIMEI UNAM, por su apoyo en la determinación de las características microscópicas de los materiales plásticos que se analizaron en este trabajo; asimismo, a los laboratoristas encargados del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UNAM, quienes me otorgaron los espacios y materiales para las distintas determinaciones necesarias para concluir la tesis. Por último, a la Dra. Mabel Vaca Mier y a la Ing. Silvia Martínez Venegas del Laboratorio de Calidad del Agua y Residuos de la UAM Azcapotzalco, por su valioso apoyo en la caracterización de los lixiviados.

Por último, agradecer a mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, por cobijarme bajo su ala y llevarme hacia un viaje lleno de experiencias fantásticas, darme la mejor educación, proporcionarme las mejores herramientas para defenderme en la vida y en el campo laboral, dejarme conocer personas maravillosas y porque desde el momento en el que leí que había sido aceptada nuevamente en sus aulas y hasta el día de hoy me han hecho sentir una puma más, porque la U.N.A.M. cambió mi vida y espero que mi aportación pueda generar un cambio positivo para que las siguientes generaciones gocen de la maravillosa educación que a mí me ofreció. Gracias U.N.A.M., gracias Posgrado de Ingeniería, soy lo que soy por y para ustedes.

Ing. Mitzy Josefina López López.
Cd. Universitaria, agosto de 2023.

RESUMEN

Este trabajo tuvo como finalidad el análisis de la degradabilidad de bolsas plásticas etiquetadas como compostables dentro de una simulación de relleno sanitario, mediante la identificación y evaluación de sus propiedades físicas a escala macro y microscópica, así como la identificación de su composición química y la evaluación de sus propiedades mecánicas.

Fueron analizados cinco tipos de bolsas plásticas etiquetadas como compostables, tres fabricadas a base de fécula de maíz y ácido poliláctico, las cuales fueron identificadas como Ecoalternativas, Wentus y Tecflex, una bolsa fabricada de PBAT (Poli Butilén Adipato-co-Tereftalato) la cual es comercializada por Grupo Eme y, por último, bolsas recolectadas de un supermercado de la Ciudad de México, de las cuales se desconocía su composición pero que estaban etiquetadas como compostables bajo la EN 13432 (“Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación”). Asimismo se incluyeron dos controles, uno de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y otro de papel.

Sobre las pruebas elegidas para evaluar el nivel de degradación de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables, destacan: el rendimiento másico, las características macro y microscópicas, la respuesta de sus espectros IR y las propiedades mecánicas. Además, se evaluaron los lixiviados generados durante la época de lluvia para verificar el funcionamiento del relleno sanitario, revisando parámetros como pH, temperatura, conductividad, DBO₅, DQO, Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales.

De acuerdo con los análisis realizados, se puede aseverar que la mayoría de las bolsas etiquetadas como compostables que fueron evaluadas (Ecoalternativas, Wentus, Tecflex y Grupo Eme) presentaron un nivel de degradación significativo (de entre el 30 y el 50% de su porcentaje en peso) después de cuatro meses de observación. Sin embargo, el control de PEAD y la bolsa del supermercado no mostraron evidencia palpable de degradación (ya que presentaron una pérdida en el porcentaje de su peso del 1 y el 5%, respectivamente). Por otro lado, y como era de esperarse, el control de papel se degradó en su totalidad.

Es necesario agregar que si bien, los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que existe evidencia de degradación, ésta no necesariamente será completa, además, el que se comience el proceso de degradación no significa que un relleno sanitario es la opción ideal para su disposición final, ya que el integrarlas desmedidamente dentro de los rellenos puede generar resultados no deseados que pueden repercutir en impactos negativos al ambiente, por ejemplo, se puede incrementar la producción de metano, aumentar la complejidad de los

lixiviados, se puede incrementar la tendencia a la presencia de microplásticos y/o además, se pueden presentar cambios en la temperatura normal del relleno.

ABSTRACT

The purpose of this work was to analyze the degradability of plastic bags labeled as compostable within a landfill simulation, through the identification and evaluation of their physical properties on a macro and microscopic scale, as well as the identification of their chemical composition and the evaluation of its mechanical properties.

Five types of plastic bags labeled as compostable were analyzed, three made from corn starch and polylactic acid, which were identified as Ecoalternativas, Wentus and Tecflex, a bag made from PBAT (Poly Butylene Adipate-co-Terephthalate) which is identified as Grupo Eme and, finally, bags collected from a Supermarket in Mexico City, whose composition was unknown, but which were labeled as compostable by EN 13432 ("Packaging and packaging. Requirements for containers and packaging recoverable through composting and biodegradation"). Two controls were also included, one made of High-Density Polyethylene (HDPE) and the other made of paper.

Regarding the tests chosen to evaluate the level of degradation of plastic bags labeled as compostable, the following stand out: mass yield, macro and microscopic characteristics, IR spectra and mechanical properties. In addition, the leachates generated during the rainy season were evaluated to verify the operation of the landfill, reviewing parameters such as pH, temperature, conductivity, BOD₅, COD, Total Solids and Total Suspended Solids.

According to the analysis, it can be stated that most of the bags labeled as compostable that were evaluated (Ecoalternativas, Wentus, Tecflex and Grupo Eme) presented a significant level of degradation after four months of observation. However, neither the HDPE control or the Supermarket bag showed considerable evidence of degradation. On the other hand, and as was to be expected, paper control degraded entirely.

It is necessary to add that although the results obtained in this work show that there is evidence of degradation, this will not necessarily be complete. In addition, the fact that the degradation process begins does not mean that a landfill is the ideal option for its final disposal, since integrating them disproportionately within the landfills can generate undesirable results. Those can have negative impacts on the environment, for example, methane production and leachate complexity can be increased, as well as the tendency to the presence of microplastics. In addition, there may be changes in the normal temperature of the landfill.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de su existencia, el ser humano ha logrado desarrollar un sinnúmero de productos que le han permitido diversificar el uso de los recursos que tiene a su alcance, con el fin de cubrir sus necesidades.

Los plásticos, son de los bienes que más beneficios económicos han generado en el mundo debido, en gran medida, a su versatilidad, resistencia, bajo costo y propiedades generales, sin embargo, su uso también ha contribuido en el incremento de los impactos negativos al ambiente. Por ejemplo, según la ONU (2017), alrededor de trece millones de toneladas de plástico son vertidas a los océanos cada año.

Debido a que la mayoría de los productos plásticos son de un solo uso y a que persiste un manejo inadecuado de sus residuos, es innegable su acumulación y presencia en el medio, lo que provoca afectaciones en la biodiversidad, en la economía y potencialmente en la salud humana. Por ejemplo, los impactos y riesgos que la presencia de los plásticos ha generado en la fauna marina, como el enredo, la asfixia, el transporte de organismos patógenos (Aliani y Molcard 2003; Woods et al. 2019), la ingestión de fragmentos de plástico (Anbumani y Kakkar 2018) y la exposición a sustancias químicas asociadas a los materiales plásticos (Alimba y Faggio 2019). En cuanto a la parte económica, se estima que los costos económicos mundiales anuales de la contaminación plástica marina con respecto al turismo, la pesca y la acuicultura, junto con otros costos, incluidas las actividades de limpieza, ascienden al menos a US\$ 6-19 mil millones a nivel mundial (Deloitte 2019). Se tienen por lo menos cuatro tipos de costos económicos identificados: los gastos reales necesarios para prevenir o recuperarse de los daños causados por los desechos marinos (por ejemplo, limpieza de playas, reparación de embarcaciones y artes de pesca, y atención médica después de accidentes relacionados con desechos marinos); pérdidas de producción o ingresos debido a interacciones con la contaminación plástica marina; pérdidas de material plástico (como material valioso retirado de la producción); y costos de bienestar, incluidos los impactos en la salud humana y la pérdida de servicios ecosistémicos, entre los que se encuentran los servicios ecosistémicos relacionados con el placer estético y la recreación (ONU-PNUMA, 2021). Por último, sobre los riesgos potenciales de los plásticos en la salud humana, se ha estimado que la ingesta anual de microplásticos por parte de algunos seres humanos oscila entre 39,000 y 52,000 partículas, según la edad y el sexo, y aumenta de 74,000 a 121,000 partículas cuando se considera la inhalación; las personas que cumplen con la ingesta de agua recomendada solo a través de fuentes embotelladas pueden estar ingiriendo 90,000 microplásticos adicionales al año, en comparación con los 4,000 en el caso de quienes consumen solo agua del grifo (Cox et al. 2019), esto, aunado a la exposición. Por otro lado, los mecanismos moleculares a través de interacciones con partículas microplásticas también podrían dañar la salud como resultado del estrés oxidativo, las reacciones inflamatorias y los trastornos metabólicos (Landrigan et al. 2020).

Con el fin de reducir estos impactos y riesgos generados debido al inadecuado manejo de los productos plásticos de un solo uso, se han elaborado distintas normativas y especificaciones en diferentes países como Suiza (ISO 14855, 16929, 17088), Estados Unidos (ASTM D5338, D6400, D6868, D8410), España (UNE-EN ISO 1629, 14855, 20200 y UNE-EN 13432) y Australia (AS 5810, 4736 y AS ISO 1629, 14855), que buscan disminuir la utilización de estos productos, pero, sobre todo, cambiar la forma en la que se generan, usan, manejan, aprovechan y disponen, logrando de este modo, un cambio positivo en el ambiente.

Actualmente, en la Ciudad de México se ha presentado la norma ambiental denominada NACDMX-010-AMBT-2019. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS QUE DEBEN CUMPLIR LAS BOLSAS Y LOS PRODUCTOS PLÁSTICOS DE UN SOLO USO, que busca: “Establecer las especificaciones técnicas que deben cumplir las bolsas de plástico para ser compostadas” (GOCDMX, 2021).

En este trabajo se busca analizar la degradabilidad de restos de bolsas plásticas compostables simulando, de forma experimental, un relleno sanitario, con el fin de identificar y evaluar si bajo estas condiciones, los materiales plásticos son capaces de sufrir degradación en un tiempo determinado. La importancia de esta tesis radica en la necesidad de conocer cómo se comportarán los plásticos compostables dentro de rellenos sanitarios, es decir, comprobar si bajo dichas condiciones, estos materiales sufren un nivel de degradación completo, parcial o simplemente no se genera ningún cambio en su estructura. Existen estudios donde se analizan diferentes plásticos compostables simulando rellenos sanitarios en laboratorio y dentro de un sitio real (Quecholac-Piña et al., 2021; Adamcová et al., 2016), donde se expone la respuesta de estos materiales, sin embargo, en ellos se muestra una metodología diferente a la que se incorporó en este trabajo, principalmente porque no se incluyeron dentro de las bolsas etiquetadas como compostables residuos orgánicos como se espera que pase dentro de la Ciudad de México.

Por último, este análisis se llevará a cabo mediante la evaluación del rendimiento másico de las muestras de bolsas etiquetadas como compostables, la obtención de sus espectros mediante tecnología de infrarrojo, la evaluación cualitativa de las bolsas de manera macroscópica (a simple vista) y microscópica (mediante el uso de un microscopio electrónico) y, por último, se analizarán los lixiviados generados para conocer su composición. Asimismo, se pretende contribuir con bases técnicas a la normatividad mencionada en el párrafo anterior y establecer recomendaciones que puedan ser de utilidad para la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, con base en los análisis realizados.

1.1. Planteamiento del problema

En 2017, el Programa de la ONU para el Medio Ambiente (PNUMA), afirmó que la contaminación plástica está presente en todas partes, desde las playas de Indonesia hasta en el fondo del océano en el Polo Norte, lo que se traduce como una problemática severa que no distingue fronteras y que puede generar complicaciones para todos los seres vivos en el futuro próximo.

Se calcula que, alrededor de 13 millones de toneladas de plástico llegan a los océanos cada año, produciendo afectaciones severas en la flora, la fauna, la economía y el ambiente en general, asimismo, sus fragmentos pueden llegar a ser potencialmente dañinos a la salud de todas las especies, lo peor es que, de seguir esta tendencia, se estima que en 2050 habrá más plásticos en los ecosistemas marinos que peces (ONU, 2017).

Las bolsas de plástico de un solo uso son un producto popular de transporte de bienes debido a su alta resistencia, versatilidad, bajo costo y propiedades generales, sin embargo, pueden generar impactos ambientales adversos debido a que, generalmente, son fabricadas con recursos no renovables a los que, en algunos casos, se les adicionan polímeros compuestos de metales pesados que pueden liberar materiales tóxicos potencialmente dañinos. Asimismo, su desintegración puede generar microplásticos que pueden dispersarse con facilidad y cuya manipulación y recolección representan un reto complejo, además, si son ingeridos por la fauna marina pueden ingresar en la cadena alimenticia de los seres humanos, generando problemas de salud (ONU, 2018).

Como resultado de la creciente producción y consumo de plásticos, los residuos de estos materiales se han convertido en un problema de preocupación mundial, ya que representan el 12% de los residuos producidos en todo el mundo (The World Bank Group, 2020). A pesar de que se han implementado diferentes estrategias nacionales e internacionales para disminuir el impacto ambiental, como la reducción en su consumo, las prohibiciones de su comercialización o el reciclaje de algunos productos, es necesario implementar acciones complementarias en las que la sociedad participe activamente.

De la misma forma, dentro de la industria se han propuesto diferentes alternativas que se centran en la implementación de plásticos de base biológica y biodegradables, como polihidroxialcanoatos (PHA), ácido poliláctico (PLA) y otros materiales novedosos que se generan a partir de proteínas, polisacáridos y algunos compuestos obtenidos a partir de combustibles fósiles. Este tipo de materia prima se ha comenzado a considerar como una opción prometedora que busca disminuir el impacto ambiental que han generado los plásticos comunes a lo largo de los años, además, promueven su integración en los ciclos naturales mediante el compostaje.

Asimismo, se ha comenzado a implementar el uso de bolsas plásticas compostables, sin embargo, es necesario regular las especificaciones técnicas ambientales y la normatividad vigente sobre el

tema así como analizar su degradabilidad en distintos escenarios para garantizar que, al comenzar su proceso de desintegración, no se generen impactos negativos para el medio y los seres vivos.

Actualmente, existen muy pocos estudios sobre la degradación de este nuevo tipo de productos plásticos tanto en la literatura científica nacional como en la de talla internacional, además, siendo un tema de suma importancia es preciso generar información confiable al respecto, así como enriquecer las investigaciones previas mediante datos experimentales que sustenten el nivel de degradabilidad en este tipo de materiales y que permitan llevar a cabo una evaluación ambiental adecuada para precisar si existe algún tipo de toxicidad.

De la misma forma, se busca, con el desarrollo de este proyecto, establecer contenido de calidad que aporte bases técnicas sólidas para el perfeccionamiento y la actualización de la Norma Ambiental NACDMX-010-AMBT-2019. Especificaciones técnicas que deben cumplir las bolsas y los productos plásticos de un solo uso.

Es importante reconocer que se requieren acuerdos gubernamentales, sociales, educativos, financieros, técnicos, legislativos y administrativos que permitan limitar el uso de productos plásticos, que implementen mejores alternativas y se desarrollen tecnologías para garantizar, en algún punto, un futuro libre de plásticos.

Por último, se necesita concientizar a los consumidores sobre los efectos negativos que genera el uso excesivo de los productos plásticos a corto, mediano y largo plazo, para que se involucren, actúen, reduzcan y conduzcan sus actividades en pro del futuro de nuestro planeta.

1.2. Justificación

La presencia de los plásticos alrededor del mundo es innegable y abrumadora, se ha convertido en uno de los problemas ambientales más graves debido a su rápida producción, alto consumo e inadecuado manejo durante su uso y posterior desecho. Si bien, los plásticos han sido considerados de los inventos que más ventajas han permitido generar a lo largo de la historia de la humanidad, actualmente se han convertido en uno de los problemas ambientales más importantes a nivel internacional.

La contaminación plástica no solo daña la forma estética de los ecosistemas que se ven afectados por ella, sino que la problemática radica en que su degradación es lenta y produce pequeños fragmentos que pueden desencadenar afectaciones a la salud cuando son ingeridos o respirados por cualquier ser vivo.

Este problema se ha vuelto tan importante que, alrededor del mundo, se han intentado desarrollar políticas para reducirlo, desde cobros de multas por utilizar bolsas plásticas hasta prohibiciones de aquellos que son de un solo uso. Al mismo tiempo, se han comenzado a implementar ciertas alternativas dentro del diseño y comercialización de los plásticos, abriendo la puerta a los materiales biodegradables y compostables.

Actualmente, en la Ciudad de México se ha presentado la norma ambiental denominada NACDMX-010-AMBT-2019. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS QUE DEBEN CUMPLIR LAS BOLSAS Y LOS PRODUCTOS PLÁSTICOS DE UN SOLO USO, que busca: “Establecer las especificaciones técnicas que deben cumplir las bolsas de plástico para ser compostadas” (GOCDMX, 2021).

Este trabajo se justifica bajo la necesidad de determinar, si en condiciones de rellenos sanitarios, los cinco tipos de bolsas plásticas etiquetadas como compostables evaluadas, llegan a presentar algún tipo de degradación dentro de un tiempo determinado. Asimismo, contribuir con bases técnicas a la normatividad mencionada en el párrafo anterior.

Por otra parte, al día de hoy en México, existe un área de oportunidad en cuanto a los estudios sobre la degradabilidad de este tipo de plásticos, aunado a ello, las especificaciones que se desean abordar en este trabajo componen una vertiente muy limitada en cuanto a datos y estudios científicos se refiere, es por ello que con el desarrollo de esta tesis se busca enriquecer la información que se tiene al respecto.

Por último, este trabajo se justifica al brindar información confiable sobre las bolsas plásticas etiquetadas como compostables que se pretenden estudiar y analizar, permitiendo que la sociedad conozca el comportamiento y degradabilidad que tienen estos materiales una vez desechados y,

con ello, puedan elegir responsablemente qué tipo de bolsas son mejores para ser comercializadas, distribuidas y consumidas dentro de la Ciudad de México.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Evaluar el nivel de degradación de cinco tipos de bolsas plásticas etiquetadas como compostables al someterlas a condiciones que simulen las celdas de un relleno sanitario y, de este modo, obtener información relevante y valiosa que pueda aportar a la norma ambiental vigente NACDMX-010-AMBT-2019 y al área científica.

1.3.2. Particulares

- Construir y simular las condiciones de un relleno sanitario, mediante modelos físicos (lisímetros) para el seguimiento de la degradación de bolsas de plástico etiquetadas como compostables conteniendo residuos sólidos municipales.
- Recabar y analizar los datos meteorológicos (temperatura, precipitación, evaporación) en Ciudad Universitaria, considerando la información disponible en el observatorio meteorológico “Mtro. Francisco Hernández Hernández” de la UNAM, para estimar, de forma teórica, la generación de lixiviados.
- Realizar el análisis de las muestras de lixiviados generados en los lisímetros, considerando el periodo de lluvias, para la evaluación posterior de los parámetros seleccionados, de esta forma, se tendrá un control sobre el funcionamiento del modelo experimental.
- Llevar a cabo el análisis de las bolsas recolectadas en los lisímetros para la determinación de los cambios físicos, químicos y mecánicos con base en la normatividad correspondiente.
- Analizar los resultados obtenidos sobre la degradación de las bolsas plásticas etiquetadas como compostables.

1.4. Alcances y limitaciones

- Para el análisis de las bolsas recolectadas se evaluarán los cambios físicos a escala macro y microscópica, su rendimiento másico, así como el cambio de su espectro IR al inicio y al final del periodo de observación, así como las propiedades mecánicas con las pruebas dentro del laboratorio de materiales (módulo elástico, máximo esfuerzo, máximo desplazamiento, rotura de esfuerzo, rotura de deformación, máxima fuerza y energía).

- Sólo serán evaluadas cinco marcas de bolsas plásticas etiquetadas como compostables (Eco-Alternativas, Plásticos Wentus, Grupo EME, Tecflex y las recolectadas del Supermercado).
- Los lixiviados serán analizados siempre y cuando exista líquido suficiente para llevar a cabo los estudios.
- Para los lixiviados, sólo serán analizados los parámetros de pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Conductividad, Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales.
- El experimento se limita a seis meses de observación.
- Se utilizarán los laboratorios de Ingeniería Ambiental, del Instituto de Investigaciones en Materiales y de la Facultad de Química de la UNAM para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas así como el reconocimiento de la composición de las bolsas. Asimismo, se contará con el apoyo del Laboratorio de Calidad de Agua y Residuos de la UAM Azcapotzalco para la evaluación de los lixiviados.

2. ANTECEDENTES

2.1. Breve historia de los plásticos

De de los inventos más recientes y populares dentro de nuestra historia son los plásticos, su uso se remonta a las culturas mesoamericanas, quienes procesaron por primera vez el caucho natural para crear pelotas, esculturas, bandas para atar algunos utensilios como hachas a mangos de madera, entre otros objetos; sin embargo, fue hasta la primera década de 1900 cuando Baekeland desarrolló como tal la industria plástica, produciendo el primer polímero sintético y su moldeado, lo que abrió el paso a la producción y comercio de distintos artículos hechos con ese material. Dicho polímero era resistente al calor y un buen aislante eléctrico, tenía la cualidad de ser manipulable y muy resistente, lo que lo volvió ampliamente popular (Science History Institute, 2021).

Alrededor de la historia de los plásticos giran distintos eventos y autores que han marcado un hito importante en el desarrollo tecnológico de estos materiales. Según Boten (2019), destacan:

El alemán Fritz Klatte, quien marcó las pautas para la producción industrial de uno de los plásticos más importantes durante el siglo XX, el cloruro de polivinilo (PVC). Si bien, su descubrimiento se debe al francés Henri Regnault en 1872, se reconoce a Klatte como el primer personaje en producirlo a gran escala. Ese tipo de plástico se destacó por su gran resistencia ante procesos químicos y ambientales y a su bajo costo de producción (pp. 4).

El profesor Hermann Staudinger, que en 1922 desarrolló su teoría de las macromoléculas, pauta que revolucionó la industria del plástico, proliferando la creación de nuevos y más desarrollados polímeros que pudieran cubrir cualquier necesidad (pp. 4).

En 1933, se crea el polietileno (PE) por accidente en una planta química en Northwich, Inglaterra. Aunque se habían creado antes pequeños lotes del producto, ésta fue la primera síntesis del material que era industrialmente práctica y fue utilizada inicialmente en secreto por los militares británicos durante la Segunda Guerra Mundial (ONU-PNUMA, 2021).

Asimismo, Fritz Stastny, quien en 1949, desarrolló el poliestireno expandido (EPS) por sus siglas en inglés, un material muy ligero que se ha utilizado en embalajes para productos frágiles y como aislante térmico. Por su parte, en ese mismo año, Karl Ziegler patentó un proceso seguro y a bajo costo para la producción de polietileno (PE), lo que lo hizo rentable y por ello ganó un premio Nobel junto a Giulio Natta en 1963 (pp. 4).

Además, Hermann Schnell, que en 1953 logró sintetizar el policarbonato (PC), plástico que combina sus propiedades mecánicas con la transparencia y que hoy en día funciona como

alternativa al vidrio en la rama de la construcción, también como material para desarrollar faros inastillables y de menor peso dentro de la industria automotriz (pp. 5).

Actualmente, la presencia de los plásticos ha generado desconcierto y preocupación internacional, pues no se ha tenido un control adecuado sobre su fabricación, comercialización, uso y repercusiones al medio ambiente y a los seres vivos; debido a su lenta degradación y fragmentación en pequeños segmentos (microplásticos), pueden generar daños a la salud de los seres vivos, por lo que se les considera como un peligro latente para el planeta.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Polímeros

Un **polímero** es una macromolécula compuesta por miles de unidades repetidas llamadas monómeros, que se unen mediante un enlace covalente, su nombre proviene del griego *poly*, que significa “muchos” y *meros*, que se traduce como “parte o segmento” (Canevarolo, 2020, p. 5). Un ejemplo de polímero es el polietileno (Figura 2.1), el cual se produce al someter al etileno a altas presiones, lo que genera un material flexible y resistente, que se puede utilizar en la elaboración de bolsas de plástico.

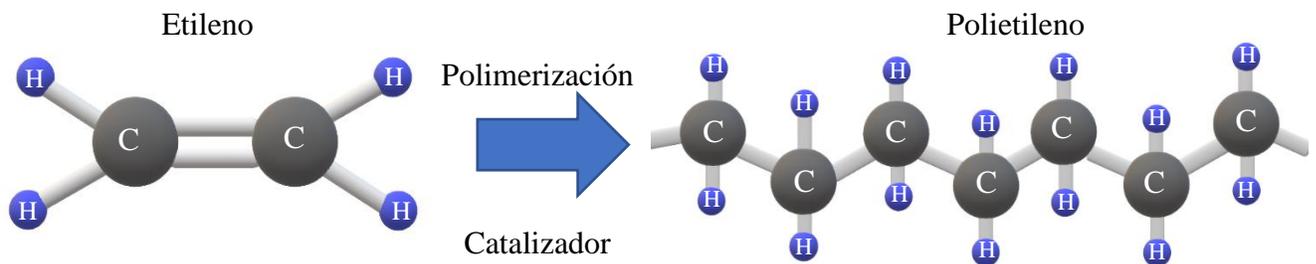


Figura 2.1. Formación de un polímero a partir de un monómero (etileno a polietileno), (elaboración propia, 2021)

Algunas de las características principales de los polímeros se mencionan a continuación:

- Presentan un peso molecular elevado.
- Poseen enlaces covalentes, mientras mayor sea el número de enlaces el polímero será más rígido.
- Generalmente son malos conductores de la electricidad.
- Generalmente son buenos aislantes térmicos.

De acuerdo con su naturaleza, es posible clasificar a los polímeros en dos grandes grupos:

- **Naturales:** este tipo de polímeros también son conocidos como biomoléculas, se encuentran presentes en los seres vivos y son necesarios para distintas funciones primordiales, ejemplos de estos son el ADN (ácido desoxirribonucleico), las proteínas y las grasas.
- **Sintéticos:** este tipo de polímeros son sintetizados a partir de ciertos polímeros (naturales y de laboratorio), mediante reacciones o procesos químicos, por ejemplo, los acrílicos, el cloruro de polivinilo (PVC) o el polietileno.

Actualmente, las bolsas plásticas son fabricadas principalmente con polímeros sintéticos como el polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad o el polipropileno. El polietileno (PE) abarca el volumen más grande de todos los plásticos. Sus características más importantes son su bajo costo y que, al ser inerte químicamente, es fácil de procesar. Por su parte, el polietileno de baja densidad (PEBD) es un polímero muy ramificado con densidad y cristalinidad baja. En cambio, el polietileno de alta densidad (PEAD) tiene una estructura más lineal y su cristalinidad y densidad son elevadas, esto lo hace un material más rígido y fuerte, asimismo, le otorgan una temperatura de fusión más alta en comparación al LDPE. Por último, el polipropileno (PP) es el más ligero de los polímeros plásticos y su resistencia comparada con su peso es muy alta (Groover, 2007, p. 161-162). A continuación, en la Tabla 2.1, se muestran algunas de las propiedades principales de estos polímeros.

Tabla 2.1. Propiedades principales de los polímeros utilizados en la fabricación de bolsas plásticas (Modificada de Groover, 2007)

<i>Polietileno (PE)</i>		
	Baja densidad (PEBD)	Alta densidad (PEAD)
<i>Método de polimerización</i>	Adición	Adición
<i>Grado de cristalinidad</i>	Común 55%	Común 92%
<i>Módulo de elasticidad</i>	140 MPa	700 MPa
<i>Resistencia a la tensión</i>	15 MPa	30 MPa
<i>Elongación</i>	100-500%	20-100%
<i>Densidad</i>	0.92-0.94 g/cm ³	0.94-0.96 g/cm ³
<i>Temperatura de fusión</i>	115°C	135°C
<i>Polipropileno (PP)</i>		
<i>Método de polimerización</i>	Adición	
<i>Grado de cristalinidad</i>	Alto, pero varía dependiendo el procesamiento	
<i>Módulo de elasticidad</i>	1,400 MPa	
<i>Resistencia a la tensión</i>	35 MPa	
<i>Elongación</i>	10-500%	
<i>Densidad</i>	0.90-0.92 g/cm ³	
<i>Temperatura de fusión</i>	176°C	

2.2.2. Plásticos

La palabra **plástico** tiene su origen en el vocablo griego *plastikos* que se traduce como “fácil de moldear o ser moldeado”. Los plásticos son materiales formados por macromoléculas orgánicas o sintéticas (polímeros) que poseen la característica de ser maleables, es decir, que pueden ser moldeados en diversas formas. Además, son relativamente económicos, resistentes, durables y versátiles, su uso ha beneficiado al ser humano alrededor del mundo en términos económicos y de generación de empleos. Sin embargo, al ser productos generalmente no biodegradables provocan graves implicaciones al medio ambiente, además, la tasa de reciclaje es muy baja (alrededor del 9% según el OCDE, 2022) y su periodo de vida es extenso.

Las principales características de los plásticos son:

- Son ligeros .
- Su costo de producción es relativamente bajo.
- Soportan grandes pesos sin romperse.
- Son resistentes a la corrosión.
- Por lo general son impermeables.
- Puede o no conducir el calor.
- Algunos pueden conducir la electricidad.
- Existen tanto plásticos no biodegradables, como plásticos biodegradables.

Según Gutiérrez (2009) los plásticos pueden clasificarse como se enuncia a continuación:

- **Termoplásticos:** son plásticos que al estar en contacto con calor se vuelven blandos permitiendo su moldeo y al enfriarse se endurecen, son polímeros de cadenas largas lineales o ramificadas (Figura 2.2 a). Este tipo de materiales pueden ser reciclados físicamente ya que al exponerlos de nuevo al calor vuelven a recobrar su plasticidad por ejemplo el PE, polipropileno, poliestireno (pp. 393).
- **Elastómeros:** son plásticos con enlaces entrecruzados (Figura 2.2.b), lo que permite que tenga una alta elasticidad, es decir que su estructura permite que después de ser deformados puedan volver a su forma original, se caracterizan porque pueden deformarse hasta 8 veces sin sufrir ningún cambio en su estructura. Un ejemplo de estos elastómeros son el polibutadieno y el caucho natural (pp. 392).
- **Termofijos:** este tipo de material forma redes de enlaces en varias direcciones (Figura 2.2c), lo que hace que se genere una sola macromolécula, es decir, al terminar su proceso de fabricación toma una forma rígida y ésta es muy difícil de fundir nuevamente. Un ejemplo de estos plásticos son las resinas fenólicas y el viniléster (pp. 393).

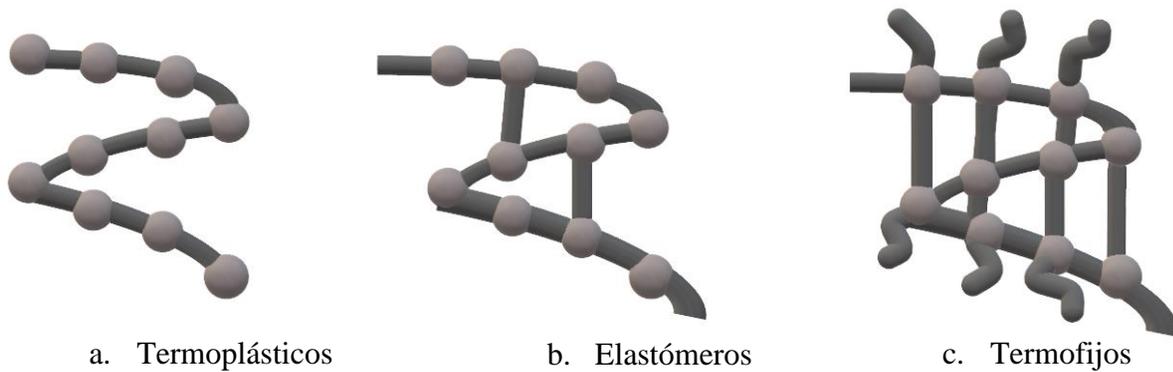


Figura 2.2. Clasificación de los plásticos por su comportamiento térmico, (elaboración propia, 2021)

2.3. Fabricación de bolsas plásticas

Según el portal de Abc-pack (2021) este proceso se lleva a cabo en tres etapas principales, la extrusión, la impresión y el corte.

Antes que nada, se debe purificar el petróleo en refinerías especializadas hasta convertirlo en un gas, específicamente en etileno, para, posteriormente, ser polimerizado y solidificado hasta crear lo que se conoce como polietileno. Después, el polietileno se corta en pequeños granos parecidos a los del arroz, a este tipo de terminado se le llama genéricamente granza o pellets. Por último, es vendido a las fábricas de bolsas u otros materiales (cables, menaje del hogar, etc.) que lo utilizan como materia base de transformación.

Cabe destacar que el polietileno tiene diferentes tipos y variaciones dependiendo de las necesidades que se requieren cubrir, sin embargo, los más usados dentro de los procesos de fabricación de bolsas plásticas son el PEAD y el PEBD.

Una vez que llega la granza de polietileno a las instalaciones de la empresa encargada de la fabricación, se continúa con la primera etapa, la extrusión.

Extrusión

En esta etapa se utilizan extrusoras, que son unas máquinas especializadas y programadas para elaborar las bolsas de acuerdo con las características y necesidades que se requieren cubrir, que sean de alta o baja densidad, con o sin polietileno lineal, deslizante o antideslizante, con o sin pigmento de color, superficie porosa o lisa, etc.

Como la granza de polietileno es transparente, se le debe añadir pigmento dentro de las tolvas de las extrusoras hasta conseguir el color deseado. La granza y el pigmento son calentadas a temperaturas cercanas a su punto de fusión, de esta manera, se vuelven inestables y es posible moldearlos con facilidad. Posteriormente, mediante una gradación en la temperatura de fusión se van conformando las características particulares de las bolsas: tamaño, resistencia, etc. Después, durante el proceso de enfriamiento, el material es recogido en forma de bobina, lo que conforma un rollo de película tubular.

Es frecuente que la película de plástico formada sea tratada con una descarga eléctrica para oxidar la superficie del plástico y facilitar la adherencia de las tintas en el material. Si se requiere de algún tipo de impresión se continúa a la siguiente etapa y, de no ser así, se pasa inmediatamente al corte.

Impresión

Durante esta etapa, el material proveniente de la extrusión se hace pasar por unos rodillos para que mediante ellos y con la ayuda de tinteros el diseño propuesto para cada bolsa quede perfecto. Es importante mantener un control adecuado en cuanto a las proporciones de las tintas, la velocidad y el tiempo de secado para evitar errores o desperfectos durante el proceso. Por último, las películas de plástico son pesadas y apiladas para comenzar con la tercera etapa.

Corte

Una vez que las películas de plástico impresas o sin impresiones llegan a corte, el primer paso es programar la cortadora con los parámetros requeridos para darle la forma estipulada, por ejemplo, una bolsa tipo camiseta, tipo mercadillo o una simple lámina. Para ello es ajustado el ancho del producto, el alto, las medidas del fuelle, de ser necesario, así como la altura y ancho de las asas, etc.

Como siguiente paso, se divide la película plástica de forma transversal mediante una cuchilla y unos cabezales que cortan y sueldan la base y la cabeza de las bolsas. Esa misma cortadora formará los paquetes de bolsas requeridas. Por último, los paquetes de bolsas son separados y almacenados para su posterior distribución y venta.

En la Figura 2.3 se observa un diagrama que resume el proceso de la fabricación de bolsas plásticas.

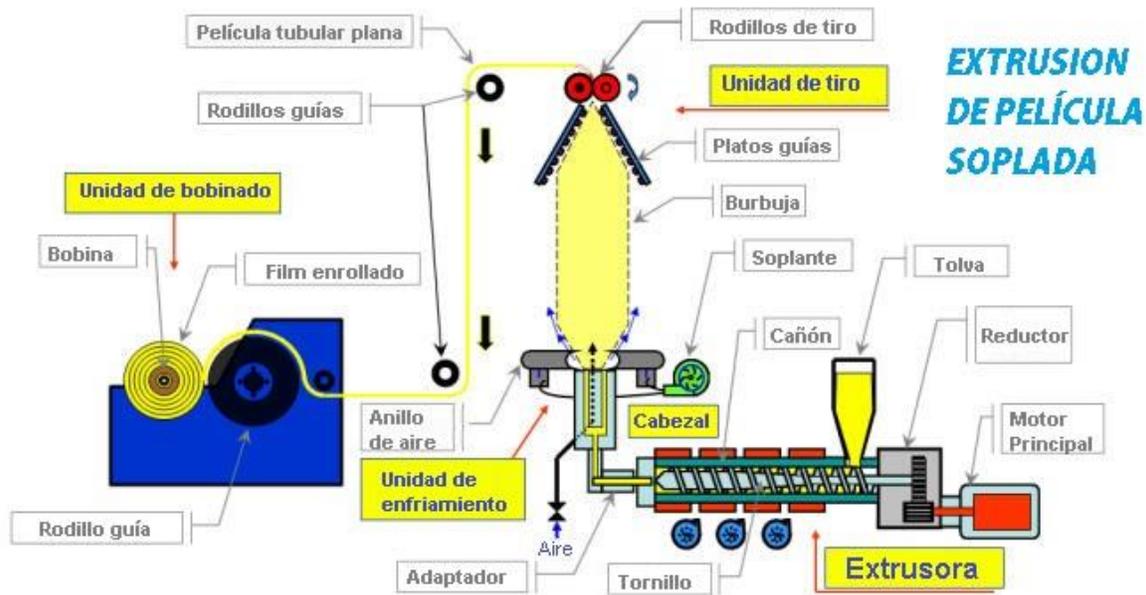


Figura 2.3. Proceso de fabricación de las bolsas plásticas (Fuente: Tecnología de los Plásticos, 2012)

2.4. Situación actual

Hoy en día el uso de los plásticos es tan común y generalizado debido a sus características, versatilidad, bajo costo y fácil manipulación que podemos encontrarlo casi en cualquier lado, desde los empaques de papas fritas hasta dispositivos electrónicos. Si bien, el uso de estos materiales ha beneficiado al mundo facilitando muchos aspectos como el transporte, el embalaje y protección de alimentos, es indiscutible que su fabricación y uso desmedido ha generado impactos ambientales y sociales más que negativos.

En la actualidad, hacerle frente a la cantidad de residuos plásticos generados es una batalla titánica, su impacto ha sido tan grande que es posible encontrar este material en prácticamente cualquier ecosistema. El escenario no es alentador, se clacula que las tasas de reciclaje de residuos plásticos no exceden el 9% (ONU, 2018), es decir, la mayoría de estos residuos terminan en tiraderos a cielo abierto, rellenos sanitarios o en el medio ambiente.

Por otro lado, es imprescindible entender que la degradación de los plásticos es lenta y que la mayoría sufre una fragmentación que genera, consecuentemente, pedazos más pequeños comúnmente conocidos como microplásticos, difíciles de manipular y recolectar.

La contaminación plástica es transfronteriza y transversal, y requiere soluciones sistémicas que abarquen políticas, tecnología, gestión, financiamiento, conocimiento e investigación, sensibilización y cambio en el comportamiento de las personas (Boucher et al, 2020).

Actualmente, se han desarrollado e impulsado diferentes iniciativas y acciones que buscan minimizar el uso excesivo del plástico, implementar nuevas alternativas con menor impacto al ambiente y concientizar a la población y a la industria productora sobre las repercusiones que estos materiales podrían tener en el planeta.

2.4.1. Políticas y acciones

El tema del plástico ha escalado hasta ser considerado de importancia internacional, el combate ante esta problemática ha generado que los gobiernos propongan diversas iniciativas, que permitan modificar el comportamiento de la sociedad en relación con el uso, comercialización, distribución y producción de bolsas de plástico.

En 2015, los miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, dos de ellos (Objetivo 12, Producción y consumo responsable y Objetivo 14, Vida submarina), involucran la reducción de plásticos como una propuesta inmediata para reducir los impactos ambientales alrededor del mundo, además, se busca el progreso económico y social bajo un esquema de sustentabilidad.

Por otro lado, en 2019 durante la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente celebrada en Nairobi, se emitió la resolución 4/6 en donde se:

“Exhorta a los Estados miembros y otros agentes en los planos local, nacional, regional e internacional, entre otros, el sector privado, la sociedad civil y el mundo académico a abordar el problema de la basura marina y los microplásticos, dando prioridad a un enfoque basado en todo el ciclo de vida y al uso eficiente de los recursos, a partir de las iniciativas y los instrumentos vigentes y con el apoyo y fundamento de los conocimientos científicos, la cooperación internacional y la participación de múltiples interesados;

Decide fortalecer la coordinación y la cooperación mediante el establecimiento, con sujeción a la disponibilidad de recursos y a partir de las iniciativas existentes, de una plataforma de múltiples interesados en el marco del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente para la adopción inmediata de medidas encaminadas a la eliminación a largo plazo, mediante un enfoque basado en el ciclo de vida, de los vertidos de basura y microplásticos en los océanos. Señalándose las funciones que ejercerá dicha plataforma.

Solicita a la Directora Ejecutiva que, por medio de su Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, elabore directrices sobre la producción y el uso de plásticos para informar a los consumidores, en particular sobre normas y etiquetas, incentivar a las empresas y los minoristas a establecer compromisos respecto del uso de prácticas y productos sostenibles, y ayudar a los Gobiernos a promover el uso de instrumentos de información e incentivos en pro del consumo y la producción sostenibles” (ONU-PNUMA, 2019).

Recientemente, en marzo del 2022, jefes de estado, ministros de medio ambiente y otros representantes de 175 países aprobaron una resolución histórica para acabar con la contaminación por plásticos y forjar un acuerdo internacional para 2024. La resolución, basada en tres proyectos iniciales estableció un Comité Intergubernamental de Negociación (INC), con la ambición de completar un proyecto de acuerdo global legalmente vinculante para finales de 2024. El instrumento jurídico refleja diversas alternativas para abordar el ciclo de vida completo de los plásticos, el diseño de productos y materiales reutilizables y reciclables, y la necesidad de mejorar la colaboración internacional para facilitar el acceso a la tecnología, la creación de capacidades y la cooperación científica y técnica (UNEP, 2022).

La mayoría de las propuestas que los gobiernos han implementado tienen como objetivo prevenir y minimizar el uso de los productos plásticos, incluidas las bolsas de un solo uso, asimismo, inculcar las prácticas de reciclaje, reutilización y valorización de los residuos plásticos además de incorporar, educar y promover la educación ambiental en todos los niveles sociales, productivos, comerciales y dentro de las mismas instancias de gobierno. Ejemplos de este tipo de iniciativas engloban: leyes, normas, proyectos, programas, políticas, gravámenes, acuerdos, incentivos, estímulos, campañas de educación y concientización, prohibiciones, etc.

Según Ritch et al., (2009) existen ciertos mecanismos de política básica que los gobiernos pueden adoptar para cambiar el comportamiento del consumidor en relación con el uso de bolsas de plástico. En la Tabla 2.2 se mencionan algunos de estos mecanismos y tipos de políticas relacionadas con la política gubernamental.

Tabla 2.2. Mecanismos de política básica para cambiar el comportamiento de los consumidores respecto al uso de bolsas plásticas (Modificada de Ritch et al., 2009)

<i>Mecanismos centrales</i>	Recursos políticos	Tipo de política	Objetivo de política
<i>Legislación</i>	Organización de coacción	Regulatorios	Consumo sustentable
<i>El “mercado verde”</i>	Finanzas	Organización de la información	Coacción redistributiva
<i>Acciones voluntarias</i>	Organización	Información	Constitución

Por su parte, el PNUMA (2018), tiene una serie de directrices para la sostenibilidad, dentro de las cuales se incluyen acciones prioritarias para minimizar los plásticos de un solo uso, incluyendo las bolsas plásticas (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Acciones prioritarias para minimizar los plásticos de un solo uso (modificada de PNUMA, 2018)

<i>Mejorar los sistemas de gestión de residuos</i>	Separación de residuos desde el origen	Recolección, transporte y almacenamiento eficaz de RSU	Reciclaje económico de materiales	Menos vertidos y desechos en el medio ambiente
<i>Promover alternativas ecológicas para eliminar progresivamente a los plásticos de un solo uso</i>	Introducir incentivos económicos	Apoyar proyectos para mejorar o reciclar artículos de un solo uso		Estimular la creación de microempresas
<i>Educar a los consumidores para que tomen mejores decisiones</i>	Educación en escuelas	Campañas de concientización	Presión pública para impulsar decisiones de los sectores públicos y privados	
<i>Habilitar estrategias de reducción voluntaria</i>	Fomentar la comprensión por parte de las personas sin un cambio súbito forzado	Promoción y adopción del uso de bolsas reutilizables		Acuerdos voluntarios entre gobierno, proveedores y productores
<i>Prohibir o imponer gravámenes sobre el uso y venta de artículos de un solo uso</i>	Instrumentos reguladores y económicos	Impuestos a proveedores, minoristas y consumidores	Prohibiciones	Responsabilidades más amplias para los productores

Dentro de los países que han impulsado políticas más contundentes en cuanto al uso de bolsas plásticas, como la prohibición total o parcial se encuentran (Cámara de Diputados, 2019):

- Francia
- Alemania
- Italia
- España
- Sudáfrica
- China
- India
- Costa Rica
- México

Otras instancias gubernamentales han impulsado el uso de diferentes alternativas basadas en plásticos de base biológica, biodegradables y compostables, sin embargo, es necesario evaluar que los productores cumplan con las especificaciones y requerimientos dispuestos en la normatividad nacional o internacional aplicable a cada tipo de producto plástico.

En México, hasta diciembre de 2019 se han presentado nueve iniciativas y cuatro proposiciones con Puntos de Acuerdo relativos al tema de plásticos (Cámara de Diputados, 2019), entre los que destacan:

- ✓ Establecer la cultura del uso de bolsas de plástico biodegradables, de base biológica o compostables.
- ✓ Prohibir la entrega de productos plásticos
- ✓ Prohibir la producción de plástico para bolsas desechables
- ✓ Establecer campañas en los tres niveles de gobierno para regular el manejo de todas las bolsas de plástico, su reúso, reciclado y manejo de los residuos producidos
- ✓ Impulsar la adquisición de nuevas tecnologías que ayuden al manejo de los residuos plásticos
- ✓ Expedir la Ley del Impuesto Federal sobre Bolsas de Plástico de un Solo Uso

Asimismo, en la Tabla 2.4 se mencionan diversas leyes estatales que se han implementado sobre el uso de bolsas de plástico en alrededor de la República Mexicana. Con estas políticas se busca reducir el consumo de estos productos así como impulsar su reciclaje y concientizar a la población acerca de los impactos que pueden generar los residuos plásticos en el medio ambiente.

Tabla 2.4. Leyes a nivel estatal: uso de bolsas de plástico (modificada de Cámara de Diputados, 2019)

<i>Prohibición total</i>	Baja California, Ciudad de México, Colima, Durango, Hidalgo, Michoacán, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Quintana Roo, Sonora, Tabasco, Veracruz, Yucatán y Zacatecas
<i>Disminución</i>	Aguascalientes, Guanajuato, Puebla, Sinaloa y Tamaulipas
<i>Eliminación de uso</i>	Baja California Sur, Chiapas, Coahuila y San Luis Potosí
<i>Cobro por bolsa</i>	Estado de México
<i>Implementación de bolsas reutilizables o fabricadas con materiales biodegradables</i>	Campeche, Chihuahua, Ciudad de México, Coahuila, Colima, Guerrero, Jalisco, Hidalgo, Michoacán, Nayarit, Nuevo León, Puebla, Sonora, Veracruz, Yucatán y Zacatecas
<i>Estímulos fiscales para producción, promoción, distribución y utilización de bolsas biodegradables</i>	San Luis Potosí
<i>Contemplan sanciones</i>	Chiapas, Ciudad de México, Querétaro, Sonora, Baja California Sur, Coahuila, Guerrero, Hidalgo, Morelos y San Luis Potosí

2.4.2. Degradabilidad

Uno de los aspectos más importantes en contra de la problemática que generan los plásticos en el mundo y que ha sido establecida en párrafos anteriores es la degradabilidad, su evaluación permite elaborar recomendaciones y tomar decisiones adecuadas al respecto.

La **degradabilidad** es la capacidad de los materiales de descomponerse en sustancias más sencillas, debido al efecto de factores externos, de reacciones químicas o por la acción de microorganismos. La forma y la velocidad a la que ocurre la degradación es diferente para cada material y cada entorno (Vázquez et al. 2018).

La degradación del polietileno en procesos de composteo es difícil, sin embargo, existen diferentes escenarios donde puede llegar a sufrir cierta degradación, aunque no es posible especificar si esto se debe a procesos biológicos o donde interviene la luz o la temperatura. Lo preocupante es que esta fragmentación produce microplásticos que pueden ser nocivos para la fauna y la salud humana.

Por su parte, la **biodegradación** es un tipo de degradación producida por la acción de microorganismos (como hongos o bacterias) o por sustancias (como algunas enzimas), que generan una mineralización del material al cual son expuestos.

Actualmente, los plásticos degradables se han clasificado en diversas categorías dependiendo del mecanismo por el cual se genera su degradación, a continuación en la Figura 2.4 se enlistan algunos de ellos.

Plásticos biodegradables

- Este tipo de plásticos se degradan por la acción de microorganismos bajo condiciones específicas de temperatura, oxígeno, pH, etc., generando una disminución en el peso molecular del material en un tiempo determinado.
- Pueden ser fabricados a partir de materiales como almidón, lácticos o fermentaciones de azúcares.

Plásticos fotodegradables

- Su degradación se genera debido a la absorción de fotones, fundamentalmente de la longitud de la luz solar (IR, visible y UV).
- Se producen utilizando aditivos basados en óxidos metálicos, generalmente de Fe o Cu.

Plásticos oxodegradables

- Se degradan en dos etapas, la primera ocurre por la acción de la temperatura y la radiación UV generando una disminución de su peso molecular. La segunda toma los subproductos generados en la etapa anterior y los exponen a la acción de microorganismos.
- Se producen utilizando aditivos que promueven la oxidación.

Figura 2.4. Clasificación de los plásticos degradables, (elaboración propia, 2021)

2.5. Otras alternativas: plásticos compostables

En la búsqueda de reducir la contaminación por plásticos innecesarios en todo el mundo, se han generado otras alternativas como el reciclaje, el reúso y la generación de plásticos con características especiales que permiten una degradación más rápida, eficiente y completa.

Los **plásticos compostables** son aquellos que sufren degradación por procesos biológicos durante el composteo resultando en CO₂, agua, compuestos inorgánicos y biomasa a una tasa comparable con otros materiales compostables conocidos y no deja residuos visibles o tóxicos (NYCE, 2019).

En la Figura 2.5 se ejemplifica, mediante un diagrama, el ciclo de vida de los plásticos compostables.

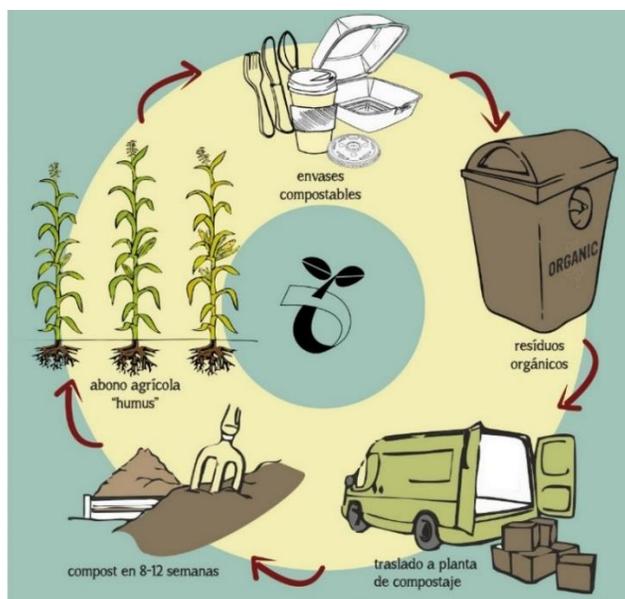


Figura 2.5. Ciclo de vida de los plásticos compostables (Fuente: <https://www.ecoologic.com/blog/envases-ecologicos-para-alimentos>, 2021)

Las principales ventajas de este tipo de materiales son: su diseño permite una degradación completa mediante el compostaje, además, permite la producción de abono orgánico, no producen residuos visibles ni tóxicos y, por último, su tiempo de degradación es mucho menor en comparación a cualquier otro plástico en el mercado siempre y cuando existan las condiciones requeridas.

Actualmente, la Ciudad de México ha presentado la norma ambiental que establece las especificaciones técnicas que deben cumplir las bolsas de plástico para ser compostadas, así como las especificaciones para el manejo de los residuos de bolsas y productos plásticos de un solo uso compostables que deben considerarse en la elaboración de planes de manejo de forma complementaria a los requisitos establecidos (GOCDMX, 2021).

2.5.1. Materiales utilizados en la elaboración de bolsas compostables

Para producir este tipo de bolsas, generalmente se parte de materias primas que contienen azúcares o ácidos grasos, especialmente plantas con alto contenido de almidón o aceites naturales que son cultivadas, cosechadas y sometidas a procesos de extracción y transformación (Vázquez, et al., 2021). De manera general, estos materiales se clasifican como biopolímeros y tienen la particularidad de cumplir con ciertos criterios, normas y especificaciones técnicas para lograr su degradabilidad completa.

Los biopolímeros se pueden clasificar según su fuente, si provienen de biomasa, monómeros bio-derivados u organismos. Los más usados en el mercado actual son:

- El almidón y la celulosa (biomasa)
- Aquellos generados mediante el uso de aceites vegetales y/o el ácido láctico (monómeros bio-derivados)
- Los polihidroxialcanoatos, PHA (biopolímeros sintetizados por microorganismos)

A continuación se hace una descripción de estos materiales, con base en las investigaciones realizadas por Valero et al., en 2013.

Biopolímeros obtenidos de la biomasa

Biopolímeros basados en almidón: ésta es la materia prima más estudiada dentro del área científica. Se forman mediante la mezcla de los polímeros: amilosa (comúnmente contiene alrededor del 25%) y amilopectina (comúnmente contiene alrededor del 75%), sin embargo, también pueden tener poliésteres alifáticos, los cuales mejoran su producción y biodegradabilidad, el más usado es la policaprolactona (PCL).

Biopolímeros basados en celulosa: formada por la unión de moléculas de β -glucosa. Algunos polímeros basados en celulosa son el celofán, el acetato de celulosa, el éster de celulosa y la celulosa regenerada para fibras.

Biopolímeros obtenidos a partir de monómeros bio-derivados

Aceites vegetales: son obtenidos de plantas, compuestos en su mayoría por triglicéridos. El polímero más importante desarrollado a partir de aceite vegetal es el poliuretano. Este tipo de materiales tienen buena resistencia ante ataques químicos (p. ej. con solventes), baja resistencia al rasgado y resistencia a altas temperaturas.

Ácido poliláctico (PLA): polímero sintético termoplástico derivado de materia prima 100% renovable a partir del ácido láctico (producto de la fermentación anaerobia de substratos que contienen carbono como la glucosa, lactosa, almidón, etc.), con bacterias u hongos, seguida de una polimerización química. Es un material biodegradable, reciclable y compostable.

Biopolímeros sintetizados por microorganismos

Poli-hidroxialcanoatos (PHA): son poliésteres lineales que se sintetizan debido a la acción de bacterias que fermentan fuentes de carbono como glucosa o fructosa o ácidos grasos volátiles. Los PHA tienen un alto grado de polimerización, cristalinidad (60-80%) y son insolubles en agua, sin embargo, su costo de producción es elevado.

En este trabajo se seleccionaron distintos tipos de bolsas compostables (fabricadas con fécula de maíz-almidón-, PLA, y PBAT, principalmente), de diferentes proveedores autorizados por la SEDEMA y de aquellos elegidos por diversas empresas de supermercados, con el fin de evaluar su nivel de degradabilidad dentro de la simulación de rellenos sanitarios.

Derivados de origen fósil

Poli-butilén adipato-co-tereftalato (PBAT): es un copoliéster alifático aromático sintético biodegradable, derivado principalmente de la condensación entre el butanodiol, el ácido adípico y el ácido tereftálico. Además, se degrada completamente mediante la acción microbiana. Es un material que aporta flexibilidad y estabilidad térmica (Mexpolimeros, 2021).

2.5.2. Normatividad vigente

Actualmente, existen diversas normas mexicanas e internacionales que contemplan, principalmente, las especificaciones estándares y criterios que deben cumplir las bolsas para ser aprobadas como compostables, asimismo, las pruebas que se deben realizar para determinar el nivel de degradabilidad de los plásticos en condiciones de compostaje controlado. Entre las más importantes destacan:

Internacionales:

- **ASTM D5338**: Método de prueba estándar para determinar la biodegradación aerobia de materiales plásticos en condiciones controladas de compostaje, incorporando temperaturas termófilas.
- **ASTM D6400**: Especificación estándar para plásticos compostables.
- **ASTM D882**: prueba de tracción de películas plásticas delgadas
- **ISO 14855**: Determinación de la biodegradabilidad aerobia final de materiales plásticos en condiciones controladas de compostaje - Método de análisis de dióxido de carbono desprendido.
- **ISO 16929**: Plásticos-Determinación del grado de desintegración de los materiales plásticos en condiciones definidas de compostaje en una prueba a escala piloto.
- **ISO 17088**: Especificaciones para plásticos compostables.
- **UNE-EN 13432**: Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje.
- **AS 5810**: Plásticos biodegradables: plásticos biodegradables aptos para el compostaje doméstico.
- **AS 4736**: Plásticos biodegradables: plásticos biodegradables adecuados para compostaje y otros tratamientos microbianos.

Mexicanas:

- **NMX-E-273-NYCE-2019:** Industria del Plástico- Plásticos compostables- Especificaciones y métodos de prueba.
- **NACDMX-010-AMBT-2019:** Especificaciones técnicas que deben de cumplir las bolsas y productos plásticos de un solo uso.

Estas normativas serán consideradas como apoyo fundamental para el desarrollo experimental de este proyecto, establecido en el capítulo 4.

2.5.3. Trabajos destacables sobre bolsas compostables en rellenos sanitarios

A pesar de ser una línea de investigación requerida en el ámbito científico internacional, los trabajos realizados con base en este tema son muy limitados, sin embargo, son un punto de partida importante para el desarrollo de esta tesis. Dentro de este apartado son mencionados, a manera de resumen, dos estudios como antecedentes y ejemplos de éxito.

Uno de los trabajos revisados se remonta a 2016, lleva por título “Degradation of Poly (lactic acid) under Simulated Landfill Conditions” de Chomnutcha Boonmee, Charnwit Kositanont y Thanawadee Leejarkpa, publicado en 2016. Dentro de este estudio se describe el cambio en las propiedades físicas y químicas que sufren los materiales fabricados con ácido poliláctico después de ser enterrados en una mezcla de suelo y lodo bajo condiciones termofílicas de 61°C, además, incluyeron condiciones de oxígeno limitado. Estos factores ambientales aunados a las actividades microbianas aceleraron el proceso de degradación del PLA. Asimismo, se comprobó una pérdida de peso del material cercana al 90% en un lapso de 90 días. Los cambios en las propiedades químicas fueron analizados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier. El porcentaje de contenido de carbono en la estructura molecular disminuyó de 49.46% a 45.42%. Se especifica que durante el proceso de degradación, las muestras de PLA se fragmentaron en pequeños pedazos frágiles con tamaños menores a 1 mm. Los autores utilizaron microscopía electrónica de barrido para observar el cambio en la morfología de los materiales, describiendo muchos poros, grietas y rugosidades en la superficie del material de PLA.

Por otro lado, uno de los estudios más recientes sobre el tema de plásticos compostables en rellenos sanitarios es el publicado en 2021 por los autores mexicanos Xóchitl Quecholac, María del Consuelo Hernández, María del Consuelo Mañón, Rosa María Espinosa y Alethia Vázquez, el cual lleva por nombre “Degradation of Plastics in Simulated Landfill Conditions” (Quecholac et al., 2021). En este estudio se evaluó la degradación de tres tipos diferentes de bolsas: polietileno de alta densidad, polietileno de alta densidad oxodegradable y compostables certificadas, todas ellas bajo condiciones simuladas de relleno sanitario durante 854 días. Los resultados mostraron que el polietileno de alta densidad tuvo una degradación limitada, evidenciada por una disminución del

13% en el alargamiento a la rotura. Por otro lado, se comprobó que el aditivo pro-oxidante en el plástico oxodegradable aumentó la pérdida de propiedades mecánicas al 27%. Sin embargo, ambas películas de plástico mantuvieron su integridad física y alto peso molecular al final del experimento. Para el material compostable se observó fragmentación y un peso molecular más bajo al final del experimento, además, la presencia de enlaces C = O disminuyó, sin embargo, se hace hincapié en que la degradación fue mucho más lenta de lo que se esperaba para este tipo de material.

Las bases que asientan este tipo de investigaciones abren el panorama a diversas vertientes que se requieren estudiar y desarrollar; si bien, el tema de los plásticos compostables es relativamente nuevo, es también una fuente de oportunidades para la mejora científica, tecnológica, legislativa y social, no solo en México sino en el mundo, por ello este trabajo pretende sembrar un aporte significativo en el vasto campo de la ciencia.

3. METODOLOGÍA

Para cumplir todos los objetivos planteados en el capítulo 1, se siguió la metodología representada en la Figura 3.1, misma que se encuentra dividida en seis etapas principales descritas a continuación.



Figura 3.1. Metodología simplificada (elaboración propia, 2022)

1. Recopilación y análisis de la información. Dentro de esta etapa se contempló una extensa búsqueda, revisión y análisis del material bibliográfico que se encuentra disponible en la literatura especializada, legislaciones, normativas y especificaciones ambientales más actualizadas y vigentes. La búsqueda de información generó el enriquecimiento de los conocimientos, los antecedentes, la problemática sobre los plásticos, las alternativas que se tienen ante ella y, por último, se complementó junto con la revisión de trabajos previos o realizados en otros países sobre el tema en cuestión.

- Los materiales de consulta incluyeron reportes e informes de autoridades municipales, estatales y federales respecto a la problemática ambiental y de salud pública que se vive en rellenos sanitarios.
- Revisión y análisis de la normatividad aplicable al tema: la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal, publicada en la Gaceta Oficial del Distrito

Federal actualizada el 23 de abril de 2021; la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, reformada el 21 de octubre de 2022 y su reglamento, actualizada el 02 de enero de 2020, publicados en la Gaceta Oficial del Distrito Federal; el PROY-NACDMX-010, la cual entró en vigor el 25 de febrero de 2022 y las Normas Oficiales Mexicanas aplicables.

- Además, se incluyó la recopilación, revisión y análisis sobre distintas propuestas metodológicas para evaluar el grado de degradación de los plásticos.
- Asimismo, el análisis de algunos estudios sobre el manejo de residuos sólidos en la Ciudad de México y los resultados de investigaciones nacionales e internacionales.
- La revisión de los manuales de procedimientos para pruebas de materiales en laboratorio, desde las perspectivas internacionales y nacionales
- Por otro lado, fueron consultados distintos recursos electrónicos, es decir, páginas especializadas y publicaciones de artículos arbitrados internacional y nacionalmente tales como: SciELO, Elsevier, Environmental and Ecological Statistics y Journal of Ecological Engineering.
- Por último, con base en la información recabada, revisada y analizada, se escribió el segundo capítulo de este trabajo, en el cual incluyen los antecedentes más importantes sobre el tema, es decir, una breve historia, el marco teórico, la fabricación de bolsas plásticas, la situación actual sobre el plástico y otras alternativas ante su uso, específicamente las bolsas etiquetadas como compostables.

2. Adaptación de modelos físicos, lisímetros. Durante esta etapa, se utilizó la infraestructura disponible en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería. De manera específica, se adaptaron los lisímetros existentes a las necesidades y requerimientos del experimento en cuestión. En general, se llevó a cabo una simulación de rellenos sanitarios con residuos sólidos urbanos, orgánicos e inorgánicos, incluyendo las bolsas de plástico etiquetadas como compostables. La instalación de los lisímetros se realizó en el techo del edificio S. Dicha infraestructura está fabricada de acrílico transparente y tienen un tamaño aproximado de 0.53 m de alto con un diámetro interior de 0.48 m y un diámetro exterior de 0.59 m, además, cuentan con una válvula para la liberación de los lixiviados y un soporte metálico para mantenerlos estables, por último, cabe señalar que para este experimento no se contempla el uso de tapa, sin embargo, los residuos sí fueron cubiertos con una capa de tierra compactada. Antes del desarrollo experimental, los lisímetros fueron revisados con el fin de evaluar si presentaban algún daño, si el drenaje era adecuado o si requerían algún tipo de mantenimiento especial, además, se realizó una limpieza exhaustiva para evitar algún tipo de contaminación al experimento que pudiera alterar los resultados.

3. Diseño y desarrollo del modelo experimental. Para esta etapa, se llevaron a cabo seis fases, descritas a continuación:

- Fase 1, recolección de bolsas etiquetadas como compostables: en esta primera parte, se incluye la búsqueda de los proveedores que han sido autorizados por la SEDEMA (Ecoalternativas S. A. de C. V., Tecflex S.A de C.V., Grupo EME 13 S.A de C.V.), el contacto con ellos y la recolección de las bolsas de plástico para el desarrollo del experimento. Una vez pactada y aceptada su participación los ejemplares fueron recolectados y resguardados hasta el momento en del montaje del experimento, asimismo, se desarrolló una base de datos donde se incluye una pequeña descripción de cada uno de ellos, así como sus características principales (Anexo A). Se incluyó además un proveedor alemán que cuenta con la certificación de plástico compostable (Plásticos Wentus) y bolsas etiquetadas como compostables de un supermercado de la CDMX, bajo la EN 13432 (“Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación”).
- Fase 2, revisión, limpieza y mantenimiento de los lisímetros: durante este periodo se llevó a cabo una inspección minuciosa de la infraestructura necesaria para la parte experimental (lisímetros), asimismo se les dio un pequeño mantenimiento con el fin evitar la presencia de fugas o cualquier problema que pudiera perjudicar el desarrollo del experimento. Por último, los lisímetros fueron sometidos a una limpieza rigurosa y se dejaron listos y a la espera del montaje del experimento.
- Fase 3, propiedades físicas y mecánicas de las bolsas etiquetadas como compostables: para este punto en primer término, se buscó evaluar el rendimiento másico haciendo una comparación de la masa inicial y final (en gramos) de los materiales plásticos mediante el uso de una balanza digital, seguido de una evaluación cualitativa de manera macro y microscópica (para esta última se estableció que fuera en después del mes 1, 4 y 6) sobre el estado físico de las bolsas, todo esto quedó documentado de manera escrita y fotográfica. Asimismo, se pidió el apoyo del Dr. Antonio Sánchez Solís y del M. en C. Eliezer Hernández Mecinas del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, con el fin de evaluar el comportamiento de las bolsas bajo ciertas condiciones de tensión (tal como se describe en la ASTM D6287-17 y D882-18). Básicamente, se busca medir el máximo desplazamiento, máximo esfuerzo, el módulo elástico, la rotura de esfuerzo y la rotura de deformación de las distintas muestras de bolsas de plástico etiquetadas como compostables, todos estos parámetros serán dispuestos en la base de datos que se genere sobre los materiales plásticos a evaluar. Por último, mediante el uso del espectrofotómetro de infrarrojo de la Facultad de Química, se obtuvo, con el apoyo de la Dra. Paulina del Valle y del Mtro. Abel Hernández, el espectro IR de cada bolsa que servirá para caracterizar e identificar los grupos funcionales presentes, dichos espectros permitirán realizar una comparación al final del experimento.
- Fase 4, recolección de residuos sólidos urbanos: dentro de esta fase, se visitó la Estación de Transferencia de la Alcaldía Coyoacán, con el fin de recolectar una cantidad considerable (~28 kg por lisímetro) de residuos orgánicos e inorgánicos,

seleccionarlos y, de esta forma, rellenar las bolsas plásticas etiquetadas como compostables necesarias para el experimento.

- Fase 5, montaje de modelos físicos (lisímetros): por último, en esta parte se llevó a cabo la instalación y adecuación de los lisímetros, simulando rellenos sanitarios. Una vez recabados y seleccionados los residuos sólidos urbanos (orgánicos e inorgánicos) y recolectados los materiales necesarios para el montaje del experimento (tierra, grava, geotextil, geomalla y el marro) se comenzó a montar el experimento. En primer lugar, se colocó una capa de grava que servirá como drenaje de los lixiviados, después se dispusieron los materiales impermeables (geomalla y geotextil) cumpliendo con una de las características principales de este tipo de sitios de disposición final; después, se rellenaron las bolsas solicitadas a los proveedores (fase 1) con residuos sólidos urbanos (orgánicos) y posteriormente se colocaron en los lisímetros intercalándolas con residuos inorgánicos compactados. Por último, se colocó una capa de tierra y se procedió a compactarla de tal manera que el diseño se asemeje lo más posible a las condiciones que tendría un relleno sanitario.
- Fase 6, propiedades químicas de los lixiviados generados en los lisímetros: como el experimento fue montado durante el periodo de lluvias se espera que se percolen lixiviados, mismos que se liberaron mediante la válvula que tienen los lisímetros y, de esta manera, se evaluaron los parámetros químicos de pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), conductividad, ST y SST con ayuda del Laboratorio de Calidad del Agua y Residuos de la UAM Azcapotzalco.

Cabe mencionar que el diseño de este experimento fue desarrollado para un periodo de tiempo de 6 meses.

- 4. Recopilación de datos meteorológicos.** En esta etapa, fueron recabados los datos meteorológicos históricos en el sitio de estudio (temperatura, precipitación, evaporación) con ayuda del observatorio meteorológico “Mtro. Francisco Hernández Hernández” de la UNAM, mismos que fueron utilizados para la determinación teórica de la cantidad de lixiviados esperada, esto permitió saber en qué fechas se obtendría líquido suficiente para las determinaciones químicas.

Una vez terminado el periodo de observación de cada lisímetro, fueron desmontados para recuperar las muestras de las bolsas y evaluar el nivel de degradación y, de la misma forma, fueron liberados los lixiviados para su posterior análisis.

- 5. Muestreo y análisis.** Una vez concluido el periodo establecido de observación, se tomaron las muestras de los lixiviados generadas en los lisímetros y se analizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua y Residuos de la UAM Azcapotzalco. Los parámetros químicos revisados fueron: pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de

oxígeno (DBO_5), conductividad, ST y SST. Es importante recalcar que estas determinaciones solo se realizaron en los meses que se generó la cantidad suficiente de lixiviados para el análisis. Asimismo que, al término de cada mes de observación, se desmontó el lisímetro correspondiente y con sumo cuidado, se extrajeron los restos de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables para su posterior análisis. Mes con mes fueron evaluadas las características físicas de los materiales de forma macro y microscópica, los espectros IR y el rendimiento másico. Además, las propiedades mecánicas se analizaron al inicio y al final del experimento, es decir, de manera preliminar y al sexto mes de observación. Una vez obtenidos todos estos datos se logró evaluar el nivel de degradación de las bolsas.

- ❖ **Etapa 6: Análisis de resultados y conclusiones.** Por último, en esta etapa se analizaron todos los resultados obtenidos durante las etapas anteriores, con el fin de evaluar el nivel de degradación de las bolsas plásticas etiquetadas como compostables después de estar enterradas seis meses en una simulación de rellenos sanitarios. Asimismo, se redactaron las conclusiones a las que se logró llegar después de realizar esta investigación.

4. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El trabajo experimental se llevó a cabo de manera metódica con el fin de cumplir los objetivos planteados anteriormente, para ello, se cubrieron seis fases principales, las cuales, se detallan en los siguientes subcapítulos.

4.1. Fase 1, recolección de bolsas de plástico etiquetadas como compostables

Como primer punto, era necesario indagar y conocer el listado de solicitudes y empresas autorizadas por la SEDEMA para la comercialización de productos plásticos de un solo uso compostables en la Ciudad de México, para, de esta manera, tener contacto con la mayor cantidad de proveedores posibles.

El primer proveedor interesado en apoyar esta tesis fue Ecoalternativas S.A. de C.V., con quienes se pactó el 10 de marzo del 2022, la donación de cincuenta de sus bolsas de plástico compostables tipo camiseta, que son fabricadas a base de fécula de maíz (Figura 4.1a). Por otro lado, se recibieron bolsas de Tecflex S.A de C.V. y películas plásticas de Grupo EME 13 S.A de C.V., que habían sobrado de un tema de tesis anterior a éste. (figuras 4.1b y 4.1c, respectivamente).

Cabe destacar que, a pesar de no estar en la lista aprobada por SEDEMA, se acordó incorporar bolsas de plástico etiquetadas como compostables procedentes de un supermercado de Berlín, Alemania (Plásticos Wentus) (Figura 4.1d) y algunas otras recolectadas en un Supermercado de la Ciudad de México (Figura 4.1e), con el fin de comparar los resultados obtenidos entre unas y otras. Además, se incorporaron dos controles, uno de polietileno de alta densidad (PEAD) y otro de papel (figuras 4.1f y 4.1g, respectivamente). Una vez recolectadas las bolsas se procedió a resguardarlas y a generar una base de datos en donde se incluyeran las características principales de cada tipo de bolsa, el nombre del proveedor, un código para identificarlas y una descripción del producto en cuestión, el formato forma parte del Anexo A.

En la Tabla 4.1 se resumen algunas de las características de las bolsas recolectadas.

Tabla 4.1. Resumen de las características de las bolsas recolectadas, (elaboración propia, 2022)

<i>Proveedor</i>	<i>Características</i>	<i>Fabricación</i>
<i>Ecoalternativas S.A. de C.V.</i>	Tipo camiseta, medidas: 31x38 con fuelle de 10 cm y calibre de grosor de 20µm	Fécula de maíz y PLA
<i>Tecflex S.A. de C.V.</i>	Bolsa estándar, medidas: 28x20 cm	Fécula de maíz
<i>Plásticos Wentus</i>	Tipo camiseta, medidas: 38x24 cm	Fécula de maíz
<i>Supermercado</i>	Bolsa en rollo, diferentes medidas en todas las muestras	No se cuenta con información
<i>Grupo Eme S.A. de C.V.</i>	Película plástica de 34 cm de ancho y ~ 3 m de largo	PBAT, fécula de maíz
<i>Control 1, PEAD</i>	Bolsa tipo camiseta, medidas: 77x46 cm y calibre de 1 mm	Polietileno de alta densidad
<i>Control 2, Papel</i>	Bolsa estándar, medidas: 49x38.4 cm y calibre de 1 mm	Papel craft



a. Bolsa plástica etiquetada como compostables de Ecoalternativas S.A. de C.V.



b. Bolsa plástica etiquetada como compostables de Tecflex S.A. de C.V.



c. Película plástica etiquetada como compostable de Grupo EME 13 S.A de C.V.



d. Bolsa plástica etiquetada como compostable de Plásticos Wentus

Figura 4.1. Bolsas de plástico etiquetadas como compostables (elaboración propia, 2022)



e. Bolsa plástica etiquetada como compostable del supermercado



f. Control 1 PEAD



g. Control 2, Papel

Figura 4.1. Bolsas de plástico etiquetadas como compostables, continuación (elaboración propia, 2022)

4.2. Fase 2, revisión, limpieza y mantenimiento de los lisímetros:

Para el desarrollo del experimento se utilizó la infraestructura disponible en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, de manera específica, los lisímetros existentes, adaptándolos a las necesidades del experimento (simulación de rellenos sanitarios).

En cuanto a las características de los lisímetros, de forma general, son recipientes cilíndricos, fabricados de acrílico transparente, tienen un tamaño aproximado de 0.53 m de alto con un diámetro interior de 0.48 m y exterior de 0.59 m, además están dispuestos sobre un soporte metálico de 0.5 m de alto (Figura 4.2), y cuentan con una válvula en la parte inferior para poder liberar los lixiviados (Figura 4.3). Es importante señalar que el soporte metálico sirve para mantenerlos estables, asimismo, recalcar que para este experimento no se utilizó tapa, sin embargo, sí se realizó la compactación de todos los residuos y la tierra que los cubrió.



Figura 4.2. Ejemplo de los lisímetros que serán utilizados para el desarrollo experimental (elaboración propia, 2022)

Se acordó que la ubicación de los lisímetros sería sobre el techo del edificio S, por lo que se cuenta con un permiso y autorización para subir cuando sea necesario. Por otro lado, se llevó a cabo una evaluación minuciosa del estado físico de los lisímetros, es decir, fueron revisados en toda su periferia y no se reportó ningún tipo de daño que requiriera de un mantenimiento correctivo extremo, por último, los lisímetros fueron sometidos a una limpieza total con el fin de prepararlos para su instalación y montaje.



Figura 4.3. Válvula inferior para el drenado de lixiviados (elaboración propia, 2022)

El día 5 de abril del 2022 se procedió a la limpieza y evaluación de los lisímetros con el fin de dejarlos listos para su posterior montaje, se utilizó una esponja, detergente biodegradable, guantes y agua para este fin. Todos los lisímetros presentaban obstrucción en las válvulas, mismas que se drenaron y limpiaron para dejarlas listas. Sólo un lisímetro presentó desprendimiento del aro

superior, mismo que fue solucionado con silicón. En la Figura 4.4 se presenta un registro fotográfico de las actividades realizadas.

En total, fueron seis lisímetros los que se utilizaron para el desarrollo de este experimento y cada uno fue desmantelado al terminar su mes correspondiente (L1 correspondiente a 1 mes, L2, correspondiente a 2 meses, L3, correspondiente a 3 meses y así sucesivamente), retirando las muestras de bolsas para el análisis de degradación y la evaluación de los lixiviados.



Figura 4.4. Limpieza y revisión de los lisímetros (elaboración propia, 2022)



Figura 4.4. Limpieza y revisión de los lisímetros (continuación) (elaboración propia, 2022)

4.3. Fase 3, propiedades físicas y mecánicas de las bolsas etiquetadas como compostables

4.3.1. Propiedades mecánicas

Para este punto, se pactó una reunión con el Dr. Antonio Sánchez Solís del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, el día 7 de abril del 2022, para platicar sobre las pruebas que se requerían hacer a las bolsas de plástico etiquetadas como compostables con el fin de conocer sus propiedades mecánicas. El doctor aceptó brindar su apoyo a este trabajo y se acordó que se realizarían dos pruebas, una al inicio del experimento y otra al final de los seis meses de observación, de esta forma se podría evaluar el comportamiento de los plásticos de manera adecuada con base en la normativa vigente (tal como se describe en la ASTM D882-18). El día 09 de septiembre del 2022 realizaron las pruebas correspondientes para obtener los resultados preliminares, se utilizó una máquina de prueba universal de la marca Shimadzu, modelo AGS-X (Figura 4.5)



Figura 4.5. Máquina de prueba universal del IIM de la UNAM (elaboración propia, 2022)

En primer lugar, se cortaron las probetas para los ensayos, mediante un cortador adaptado para este fin. En total, se realizaron 12 probetas de 2.5x15 cm para tener dos por cada muestra de bolsa compostable (las 6 correspondientes al inicio experimento y una vez completados los seis meses las últimas 6), mismas que fueron probadas en la máquina de prueba universal del Instituto de Materiales a una velocidad de cruceta constante. La prueba final se realizó el 1 de febrero de 2023, con ello, se pudo evaluar qué tanto cambiaron las propiedades mecánicas de las bolsas y, de esta manera, comprobar si existe algún nivel de degradación.

4.3.2. Características macro y microscópicas

Se evaluaron las muestras de bolsas plásticas etiquetadas como compostables de manera macroscópica (a simple vista) y también con la ayuda del microscopio electrónico (de manera preliminar y durante los meses 1, 4 y 6), con el fin de identificar los patrones y la morfología general de las bolsas tanto al inicio del experimento como al término de cada periodo de observación. De esta forma, se generó un reporte cualitativo del estado físico de las bolsas, amparado de un reporte fotográfico que permitió sustentar la evaluación.

Para el desarrollo de esta actividad, se utilizó el equipo disponible en el laboratorio de Microscopía Electrónica de la Facultad de Ingeniería y los datos obtenidos fueron almacenados en una bitácora (Anexo B) para su comparación final. Esta información formó parte de los parámetros representativos para medir el nivel de degradación de las bolsas.

Para la evaluación microscópica, se solicitó el apoyo del Mtro. Jorge Romero y del Biol. Germán Álvarez Lozano de la División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica para usar su microscopio electrónico y poder observar las características de las bolsas, asimismo, compararlas a lo largo del periodo de observación y buscar evidencias de desgaste o degradación. El microscopio es de la marca Philips, serie XL20 (Figura 4.6), que incluye también un equipo de cómputo para obtener las imágenes y un compresor. Las pruebas preliminares fueron realizadas el día 27 de julio de 2022, con una potencia de entre 5 y 10 kV, a tres aumentos a 500x, 800x y 1000x y utilizando un detector de Electrones Secundarios (SE), el cual permite observar la morfología, topografía y textura de las muestras. Es importante señalar que esta determinación solo se realizó en los meses 1, 4 y 6, esto para cumplir con los tiempos estipulados y por la carga de trabajo que tienen en ese laboratorio.



Figura 4.6. Microscopio electrónico de la DIMEI, (elaboración propia, 2022)

La primera evaluación cualitativa se realizó el 27 de julio de 2022, la siguiente el 15 de agosto de 2022, la tercera 17 de noviembre de 2022 y la última el 16 de enero de 2023.

4.3.3. Rendimiento másico

Las muestras de materiales plásticos etiquetadas como compostables obtenidas fueron pesadas con ayuda de una balanza digital antes del montaje del experimento, a su vez, mes con mes hasta el final del experimento este procedimiento fue replicado; todo esto con el fin de evaluar la pérdida de masa (en gramos). Cabe mencionar que para estas actividades se utilizaron los instrumentos de medición que se encuentran en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Posgrado. Por último, toda esta información quedó registrada en una bitácora exclusiva para llevar el control de los pesos durante el periodo de observación (Anexo C), misma que fue sustentada con su respectivo reporte fotográfico.

Los pesos iniciales (preliminares) fueron evaluados el 28 de julio de 2022 y la fecha del último pesaje fue el 13 de enero de 2023.

4.3.4. Análisis por Espectroscopía de Infrarrojo (IR)

Este tipo de análisis mide la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra y proporciona información sobre los grupos funcionales presentes en ella (UMAT, 2019). El equipo donde se lleva a cabo la interacción entre la materia (muestra) y la radiación es un espectrofotómetro de IR. El resultado se lee en un gráfico (espectro) donde se puede visualizar la absorbancia (o transmitancia) de luz infrarroja en el eje vertical frente a la frecuencia o longitud de onda en el eje horizontal. (Mondragón, 2017).

Esta técnica pretende ser una un apoyo que permita identificar picos y bandas de absorción con el fin de demostrar el inicio del proceso de degradación de las bolsas plásticas etiquetadas como compostables. Por tal motivo, se utilizó el espectrofotómetro de IR de la Facultad de Química al inicio del experimento y después cada mes hasta el final del periodo de observación, todo esto con el fin de comparar los resultados obtenidos y tener las evidencias consistentes para definir el nivel de degradación que pudieran sufrir los materiales plásticos.

El día 28 de julio de 2022 se realizaron las pruebas preliminares dentro de la Facultad de Química, en el espectrofotómetro de infrarrojo (IR) marca Perkin Elmer, modelo Spectrum Two (Figura 4.7), con apoyo de la Dra. Paulina del Valle y el Mtro. Abel Hernández, para determinar los espectros de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables, incluyendo el control 1 de polietileno de alta densidad (PAD), es importante recalcar que el control de papel no pudo ser probado porque el haz de luz no puede pasar a través de materiales tan opacos.

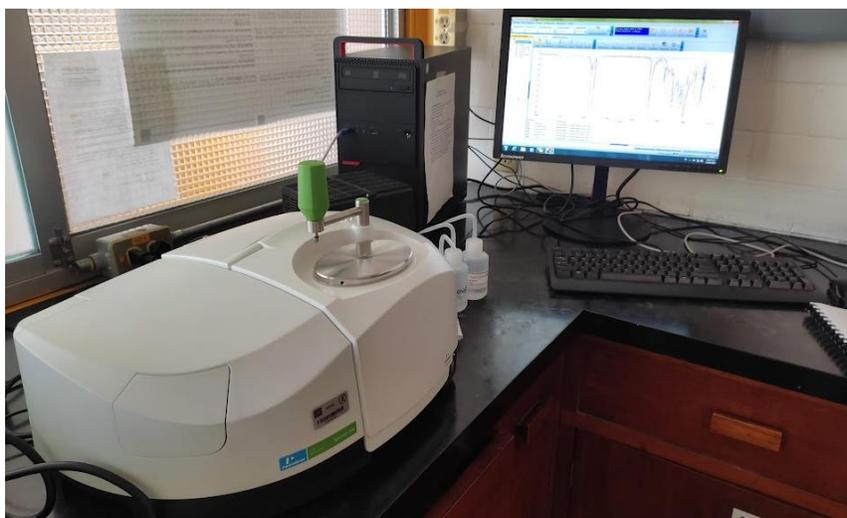


Figura 4.7. Espectrofotómetro de IR marca Perkin Elmer de la Facultad de Química de la UNAM, (elaboración propia, 2022)

Las pruebas preliminares se realizaron el 28 de julio de 2022 y la prueba final se llevó a cabo el 17 de enero de 2023.

4.4. Fase 4, recolección de residuos sólidos urbanos

Se realizó una visita a la Estación de Transferencia ubicada en Calzada de Tlalpan 3350, Colonia Viejo Ejido de Santa Úrsula Coapa, en la Alcaldía Coyoacán, con el fin de recolectar una cantidad considerable de residuos sólidos urbanos orgánicos e inorgánicos, aproximadamente 28 kg por lisímetro, mismos que fueron utilizados para el llenado de las bolsas plásticas compostables necesarias para el experimento y de los lisímetros.

Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó equipo de protección personal como guantes, goggles, botas con casquillo y bata, una lona de plástico donde fueron depositados los residuos, palas para recolectarlos y una camioneta pick up para su transporte.

Dicha actividad fue realizada el día 14 de junio del 2022, de esta forma y con todos los permisos correspondientes, se llevó a cabo la recolección de los residuos. Posteriormente, fueron trasladados al edificio S del Posgrado de Ingeniería en Ciudad Universitaria, lugar donde se realizó el relleno de las bolsas compostables y, asimismo, de los lisímetros.

4.5. Fase 5, montaje de modelos físicos (lisímetros)

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, un relleno sanitario es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME), con el fin de controlar los impactos ambientales. En la Figura 4.8. se muestra la conformación típica de un relleno sanitario.

Una de las partes más importantes de un relleno sanitario es la impermeabilización, ésta pretende evitar, en la medida de lo posible, que existan infiltraciones de lixiviados al suelo y a los acuíferos cercanos al sitio de disposición final. Siguiendo con las especificaciones de la norma mencionada en el párrafo anterior, los sitios de disposición final deben contar con una barrera geológica natural o equivalente, con un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica, de al menos 1×10^{-7} cm/s sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final; o bien, garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente. Para el caso del diseño experimental que se estableció, se determinó el uso de una geomembrana sintética y un geotextil, materiales que fueron colocados al fondo de cada lisímetro con el fin de crear una barrera impermeable adecuada para la simulación.



Figura 4.8. Conformación típica de un relleno sanitario (fuente: Río Negro, 2022)

Una vez integrada la impermeabilización, los residuos deben ser esparcidos y compactados reduciéndolos al menor volumen posible y al final del día deben ser cubiertos con una capa de tierra, de esta manera se construye la celda diaria. De acuerdo con el Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para RSU (SEMARNAT, 2009), las celdas son subdivisiones o compartimentos de vertido dentro del relleno sanitario, básicamente es el cuerpo geométrico que se forma durante la operación del relleno sanitario. Generalmente, las celdas se construyen de forma diaria, de esta manera, al terminar la jornada los residuos quedan cubiertos y aislados, evitando que se generen malos olores, esparcimientos por acción del viento, que exista proliferación de vectores nocivos y mejora las condiciones sanitarias del relleno y de las áreas circundantes.

4.5.1. Cálculo de los residuos que serán dispuestos en los lisímetros

Como se mencionó anteriormente, se tomó una muestra representativa de residuos sólidos urbanos, con el apoyo de la Estación de Transferencia de Coyoacán, ubicada en Calzada de Tlalpan 3350, Colonia Viejo Ejido de Santa Úrsula Coapa, en la Alcaldía Coyoacán, de la Ciudad de México (Figura 4.9), mismos que fueron dispuestos dentro de los lisímetros instalados en la azotea del edificio S del Posgrado de Ingeniería.



Figura 4.9. Patio de maniobras de la E.T. de Coyoacán (elaboración propia, 2022)

El tamaño y diseño de las celdas depende de la cantidad de residuos sólidos que requieren disposición. Sus dimensiones se definen teóricamente como un paralelepípedo donde los elementos básicos son: altura, longitud, ancho y taludes e inclinación (SEMARNAT, 2009). Para el caso de este diseño experimental tanto el ancho como la longitud y los taludes e inclinación quedan descartados, ya que la simulación del relleno sanitario se hará dentro de los lisímetros, mismos que tienen una forma cilíndrica que se rellenará ocupando la mayor parte del volumen disponible.

Es por ello, que se calculó la cantidad de residuos a considerar para el diseño del experimento. De esta manera se obtuvo la siguiente información:

$$A_{lisímetro} = 2 * \pi * r * h + 2\pi r^2 \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde:

$A_{lisímetro}$: área del lisímetro

π : pi

r : radio interno del lisímetro

h : altura del lisímetro

$$V_{lisímetro} = \pi * r^2 * h \quad \text{Ec. 4.2}$$

donde:

$V_{lisímetro}$: volumen del de lisímetro

π : pi

r : radio interno del lisímetro

h : altura del lisímetro

Por lo tanto:

$$A_{\text{lisímetro}} = 2 * \pi * (0.24 \text{ m}) * (0.51 \text{ m}) + 2\pi(0.24 \text{ m})^2 = 1.13 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{lisímetro}} = \pi * (0.24 \text{ m})^2 * 0.51 \text{ m} = 0.092 \text{ m}^3 \text{ (por lisímetro)}$$

Para el material de cobertura, dentro de la literatura se recomienda que el espesor de la capa sea de entre 15-25 cm para las celdas de 4 m, debido a la escala del experimento se eligió una capa de tierra de 5 cm. Por otro lado, se requiere conocer el volumen de la cobertura compactada, misma que se podrá conocer con la ecuación 4.3.

$$V_{\text{cobertura}} = \text{Espesor} * \text{Área de lisímetro} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$V_{\text{cobertura}} = 0.05 \text{ m} * 1.13 \text{ m}^2 = 0.0565 \text{ m}^3 \text{ (por lisímetro)}$$

Del mismo modo, se puede obtener el volumen de grava requerido para la capa de drenaje:

$$V_{\text{drenaje}} = 0.03 \text{ m} * 1.13 \text{ m}^2 = 0.0339 \text{ m}^3 \text{ (por lisímetro)}$$

De esta manera, si se descuenta el volumen de la cobertura y del material para el drenaje se puede determinar el volumen de residuos necesarios para el experimento (Ec. 4.4):

$$V_{\text{residuos}} = V_{\text{lisímetro}} - V_{\text{cobertura}} - V_{\text{drenaje}} \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$V_{\text{residuos}} = 0.092 \text{ m}^3 - 0.0565 \text{ m}^3 - 0.0339 \text{ m}^3 = 0.0016 \text{ m}^3$$

Considerando un peso volumétrico de los residuos sólidos urbanos de 300 kg/m^3 se puede calcular la cantidad total de residuos necesarios para el experimento, siguiendo la ecuación 4.5:

$$\text{Cantidad}_{\text{residuos}} = V_{\text{lisímetro}} * \text{Peso volumétrico} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$\text{Cantidad}_{\text{residuos}} = 0.092 \text{ m}^3 * 300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 27.6 \text{ kg} = \sim 28 \text{ kg} \text{ (por lisímetro)}$$

$$\text{Cantidad total}_{\text{residuos}} = 28 \text{ kg} * 6 \text{ lisímetros} = 168 \text{ kg} = 0.168 \text{ t}$$

Por último, para la compactación en la NOM-83-SEMARNAT-2004, se establece un nivel mínimo de compactación de los residuos en función del tipo de la categoría del sitio y capacidad de recepción de residuos diaria (Tabla 4.3). La compactación de residuos permite la reducción del volumen de los residuos, incrementando la vida del relleno sanitario y mejorando la evolución del residuo para su estabilización en las condiciones óptimas. También se reducen los impactos producidos por los animales, peligro de fuego y se minimizan los asentamientos (SEMARNAT,

2009). Con base en la norma y la cantidad de residuos que se dispondrán en los lisímetros, se elige la *compactación de baja densidad*, en esta categoría, los residuos depositados en la zona de vertido son esparcidos y podrían llegar a alcanzar compactaciones de hasta 300 kg/m³.

Tabla 4.3. Requerimientos de compactación (modificada de SEMARNAT, 2004)

<i>Sitio</i>		<i>Compactación residuos kg/m³</i>	<i>Recepción diaria de residuos t/día</i>
A	A1	>700	>750
	A2	>600	100-750
B		>500	50-100
C		>400	10-50
D		>300	<10

Una vez listos todos los materiales e instrumentos necesarios, se procedió a montar los modelos físicos (lisímetros) para simular los rellenos sanitarios. A continuación se describen las actividades desarrolladas:

- Relleno de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables con los residuos sólidos urbanos recolectados (orgánicos). Previamente, a las bolsas se les colocó un código para poderlas identificar una vez concluido el tiempo de observación.
- Colocación de la capa de grava que será de ayuda para el drenado de los lixiviados.
- Colocación de la geomembrana y el geotextil dentro de los lisímetros, mismos que servirán como la zona impermeable del relleno sanitario.
- Disposición de las bolsas rellenas con residuos orgánicos y la disposición de los residuos inorgánicos dentro de los lisímetros, además de la compactación manual correspondiente.
- Colocación de capa de tierra (5 cm) para cubrir muy bien las bolsas y los residuos.
- Compactación del material de cobertura, de esta forma se cumplieron todos los requerimientos para simular un relleno sanitario de manera adecuada.

El montaje del experimento fue realizado los días 14, 15 y 16 de junio con el fin de aprovechar el inicio de la época de lluvias y de esta manera poder obtener también la cantidad necesaria de lixiviados para su análisis.

4.5.2. Recolección de los RSU y montaje del experimento

El día 14 de junio del 2022 se visitó la Estación de Transferencia de la Alcaldía Coyoacán para la recolección de los residuos sólidos urbanos, tanto de la fracción orgánica (FORSU) como inorgánica (FIRSU), al final se optó por colocar una lona sobre la caja de la camioneta que se

facilitó para el transporte (Figura 4.10a), de esta manera, transportar la mayor cantidad de residuos posibles (Figura 4.10b).



a. Colocación de la lona en la camioneta

b. Llenado de los RSU

Figura 4.10. Disposición y transporte de los RSU necesarios para el montaje del experimento (elaboración propia, 2022)

Una vez que se llenó el vehículo con RSU necesarios, fueron trasladados al Edificio S del Posgrado de Ingeniería para comenzar con el montaje del experimento, el cual se realizó en el techo del mismo edificio. Con ayuda del personal de intendencia y mediante el uso de recipientes de 40 L se comenzaron a subir de a poco los residuos obtenidos de la estación de transferencia y fueron colocados sobre una lona dispuesta en el techo del edificio antes mencionado (Figura 4.11), de esta manera se facilitarían la selección y relleno de las bolsas y de los lisímetros.



Figura 4.11. Disposición de los residuos previo al montaje del experimento (elaboración propia, 2022)

Antes de comenzar a rellenar las bolsas de plástico etiquetadas como compostables, se requirió elaborar un conducto de drenaje para la descarga de los lixiviados, que consistió en la

incorporación, dentro de los lisímetros, de una capa de al menos 4 cm de grava (Figura 4.12a), seguida de una geomembrana de 1 mm de espesor y un geotextil de 140 g/m² (Figura 4.12b) en forma de cono para que los lixiviados corran hacia el centro del lisímetro, debido a que es aquí donde se encuentra la válvula para que, posteriormente, puedan ser recolectados. A la geomembrana se le realizó una perforación al centro para poder captar los lixiviados generados y dejarlos fluir hacia la válvula.



a. Capa de grava



b. Colocación de la geomalla y el geotextil

Figura 4.12. Colocación del drenaje necesario para la captación de los lixiviados (elaboración propia, 2022)

Después de repetir este mismo procedimiento para los seis lisímetros que conformaron el experimento, se procedió al llenado de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables con la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) incluyendo cantidades que no forzaran el rompimiento por peso de las mismas (entre 200 y 1000 g, aproximadamente), a continuación se observa el pesaje de algunas muestras, es importante recalcar que el pesaje ya incluye la tara del recipiente (Figura 4.13).



a. Ecoalternativas 1



b. Supermercado 2



c. Wentus 3



d. Tecflex 4



e. Grupo EME 5



f. Control 1

Figura 4.13. Pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables rellenas de FORSU (elaboración propia, 2022)



g. Control 2

Figura 4.13. Pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables rellenas de FORSU (continuación) (elaboración propia, 2022)

Como siguiente paso se comenzaron a disponer las bolsas de plástico etiquetadas como compostables dentro de los lisímetros. Todos los lisímetros contenían una bolsa de cada tipo, de esta forma se fueron colocando una capa de bolsas y una residuos inorgánicos compactados mediante un marro y un cartón para uniformizar todo (figuras 4.14a, 4.14b y 4.14c). Además, se añadieron tubos perforados para dejar salir el biogás (Figura 4.14d). Para finalizar, todo fue cubierto con una capa de tierra de 5 cm de espesor bien compactada (Figura 4.14e).



a. Primera capa de bolsas de plástico etiquetadas como compostables



b. Capa de residuos inorgánicos

Figura 4.14. Montaje de los lisímetros (elaboración propia, 2022)



c. Segunda capa de bolsas plásticas y controles



d. Ubicación de los tubos para monitoreo de gas



e. Material de cubierta compactado

Figura 4.14. Montaje de los lisímetros (continuación) (elaboración propia, 2022)

Todo este procedimiento se realizó para los seis lisímetros que conforman el experimento, mismos que fueron revisados de manera periódica para evaluar su comportamiento.

4.6. Fase 6, propiedades químicas de los lixiviados generados en los lisímetros

El experimento fue montado a mediados de junio, justo durante el inicio del periodo de lluvias por lo que se esperaba una percolación de lixiviados considerable, mes con mes se liberó la válvula localizada en la parte inferior de los lisímetros, aunque solamente se logró obtener líquido suficiente para los análisis durante el primer y segundo mes de observación. Los parámetros químicos evaluados fueron los siguientes:

- pH
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Conductividad
- Sólidos Suspendidos Totales

- Sólidos Totales

Para obtener estos parámetros, se involucró al Laboratorio de Calidad del Agua y Residuos de la UAM Azcapotzalco, donde la Ing. Silvia Martínez Venegas y su equipo fueron los encargados de la parte analítica. Estas determinaciones estaban pactadas para ser realizadas mes con mes, siempre y cuando existiera lixiviado suficiente para los análisis, desafortunadamente solo se logró recolectar durante los primero dos meses de observación, el tercer mes se obtuvo menos de 5 mL de líquido por lo que no fue posible llevar a cabo las determinaciones. En el caso de los últimos tres meses los lisímetros estaban completamente secos, por lo que no se pudo analizar nada más.

5. RESULTADOS

5.1. Pruebas preliminares

A continuación se describen todas las pruebas que fueron realizadas a las bolsas plásticas etiquetadas como compostables de manera preliminar, mismas que se llevaron a cabo durante la última semana del mes de julio y la primera de agosto del 2022.

5.1.1. Análisis por Espectroscopía de IR

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

En la Figura 5.1, se puede observar el espectro del control 1 de polietileno de alta densidad (PAD), en ella se muestran tres grupos de bandas correspondientes a los enlaces C-H a $2,916.20\text{ cm}^{-1}$, C-C a $1,462.91\text{ cm}^{-1}$ y el grupo metileno ($-\text{CH}_2-$) en 719.14 cm^{-1} .

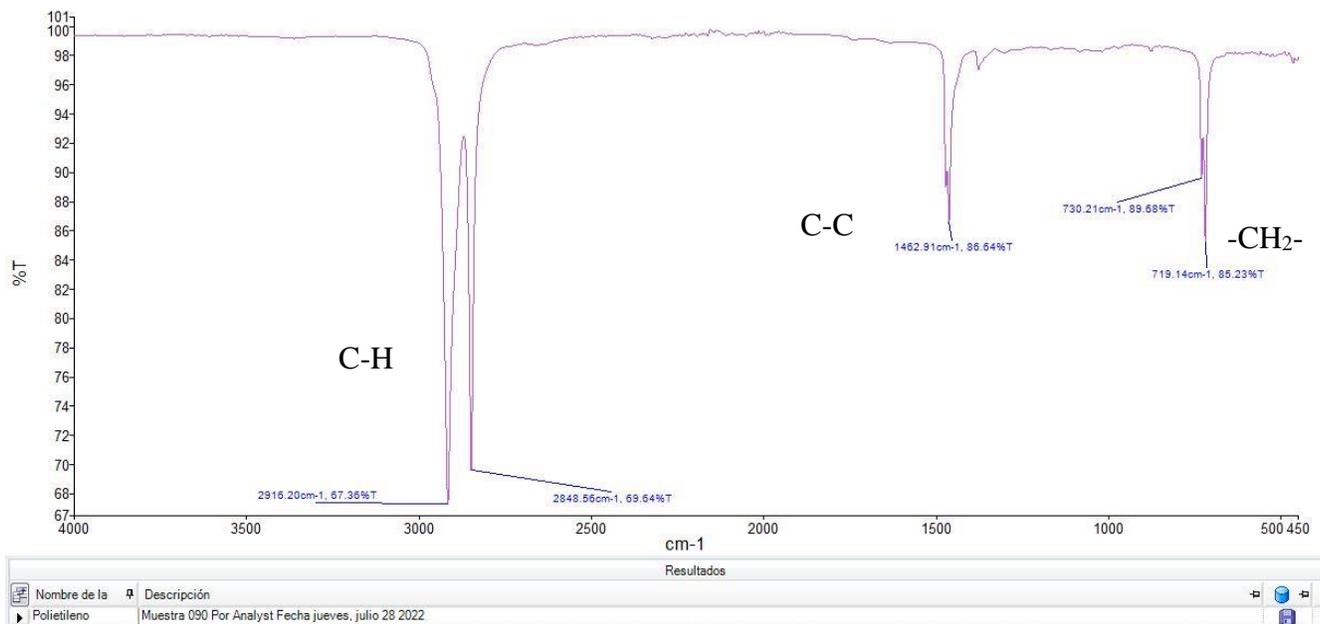


Figura 5.1. Espectro de la bolsa de control de PEAD (elaboración propia, 2022)

En la Figura 5.2, se muestran los 18 picos más importantes de la bolsa Ecoalternativas; en primer lugar, se observa el enlace O-H del agua a $3,394.72\text{ cm}^{-1}$ y entre $2,917.84\text{ cm}^{-1}$ y 2849.86 cm^{-1} se tienen enlaces C-H. Aparece un pico en 1712.07 cm^{-1} , de acuerdo con Wu (2005) este pico es atribuido a grupos carbonilo (C=O). El área limitada a partir del pico seis en adelante corresponde al área de “huella dactilar”, la zona de 1457.92 cm^{-1} a 1389.59 cm^{-1} tiene un espectro similar al del

ácido poliláctico (Figura 5.3), de la misma forma, la zona de $1,119\text{ cm}^{-1}$ a 873.17 cm^{-1} se parece mucho al espectro de la fécula de maíz (Figura 5.4), donde son característicos los enlaces C-C-, C-O y C-O-H.

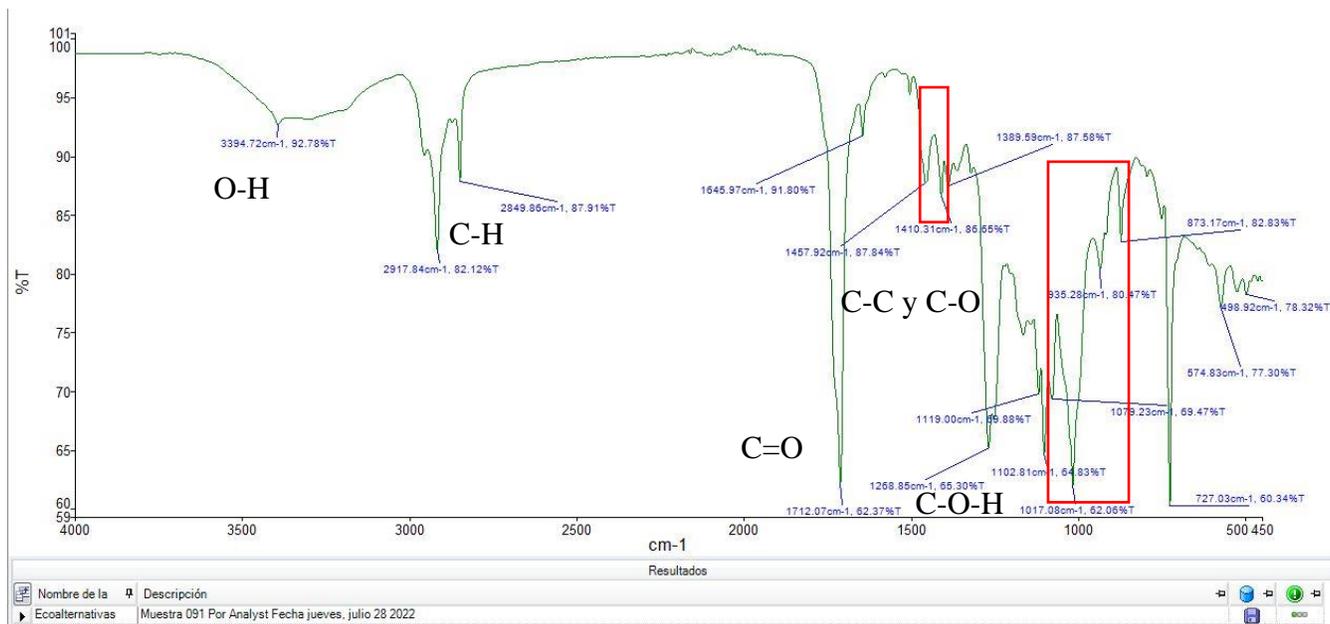


Figura 5.2. Espectro de la bolsa etiquetada como compostable Ecoalternativas (elaboración propia, 2022)

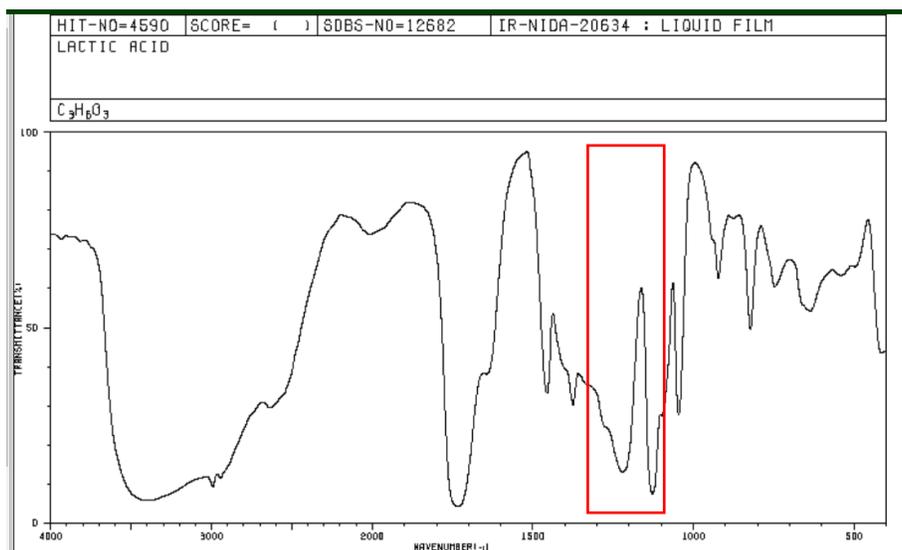


Figura 5.3. Espectro del PLA (obtenido del Spectral Database for Organic Compounds, 2022)

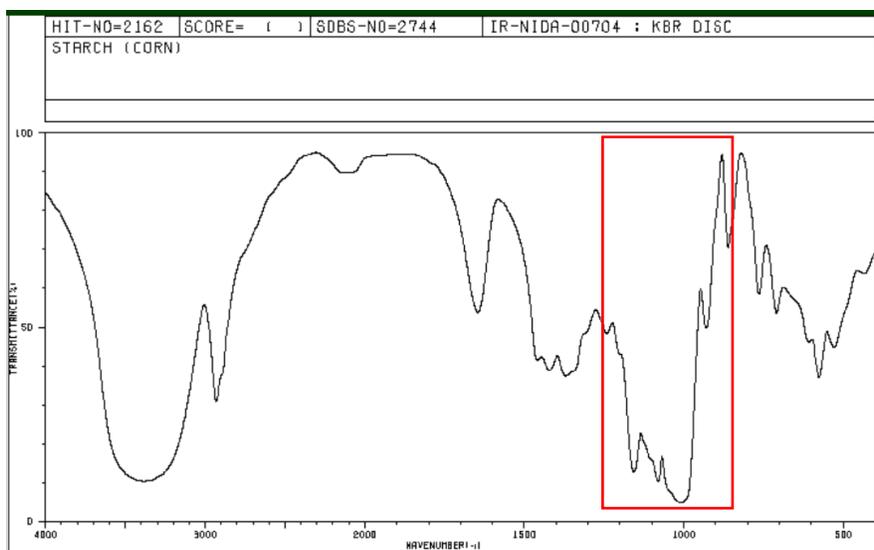


Figura 5.4. Espectro del almidón de maíz (obtenido del Spectral Database for Organic Compounds, 2022)

Las bolsas de Tecflex y Wentus, presentaron un espectro muy similar al de Ecoalternativas (Figuras 5.5) y sólo se ven algunos picos donde se absorbió más la luz, por lo que se determinó que las tres bolsa están fabricadas con los mismos materiales (Fécula de Maíz y PLA), debido a que solamente difieren un poco en las proporciones de estos materiales. De igual forma, los enlaces que se observaron fueron O-H ($3,394.74 \text{ cm}^{-1}$), C-H ($2,920.50\text{-}2,850.07 \text{ cm}^{-1}$), y el grupo C=O ($1,711.59 \text{ cm}^{-1}$).

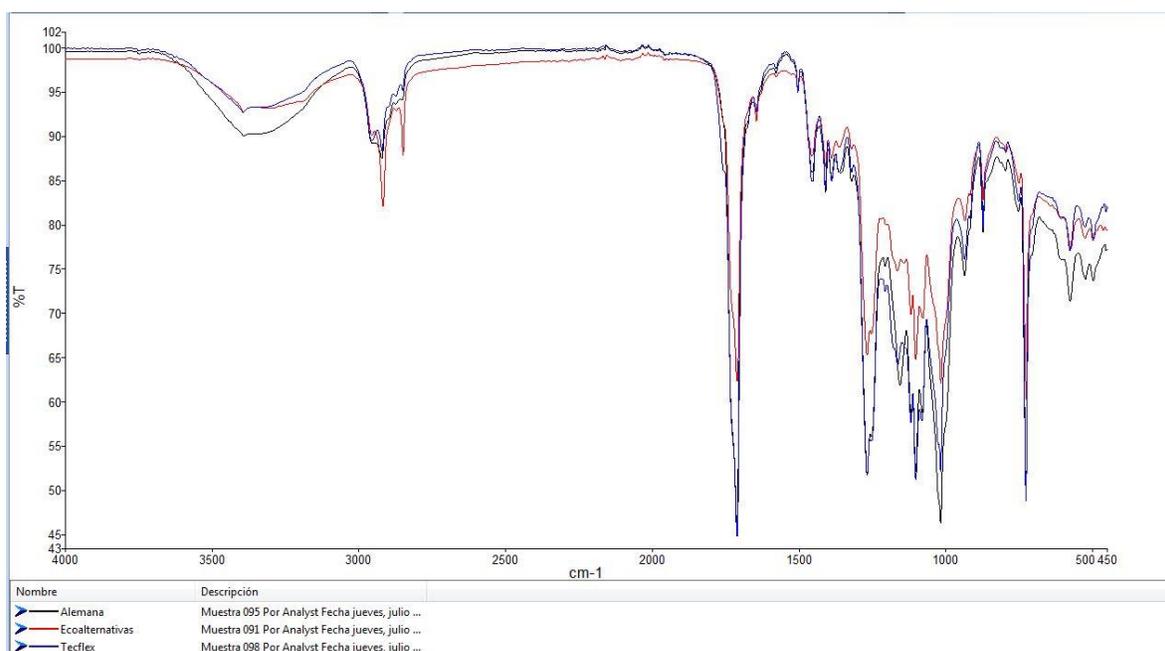


Figura 5.5. Comparación de los espectros IR de las bolsas Wentus, Tecflex y Ecoalternativas (elaboración propia, 2022)

En cuanto a la bolsa de Grupo EME, el espectro (Figura 5.6) se parece mucho a lo que se reporta en la literatura como PBAT (Figuras 5.7a y 5.7b), asimismo, se observan los picos más importantes, específicamente los de $2,920\text{ cm}^{-1}$ correspondiente al enlace CH_2 , $1,711.59\text{ cm}^{-1}$ asociado a $\text{C}=\text{O}$, $1,410.29\text{ cm}^{-1}$ asociado a $-\text{CH}_2-$ y $1,268.25\text{ cm}^{-1}$ que se atribuye al enlace de $\text{C}-\text{O}$, mismos que se asemejan bastante a los valores reportados en los diferentes textos científicos para este tipo de material.

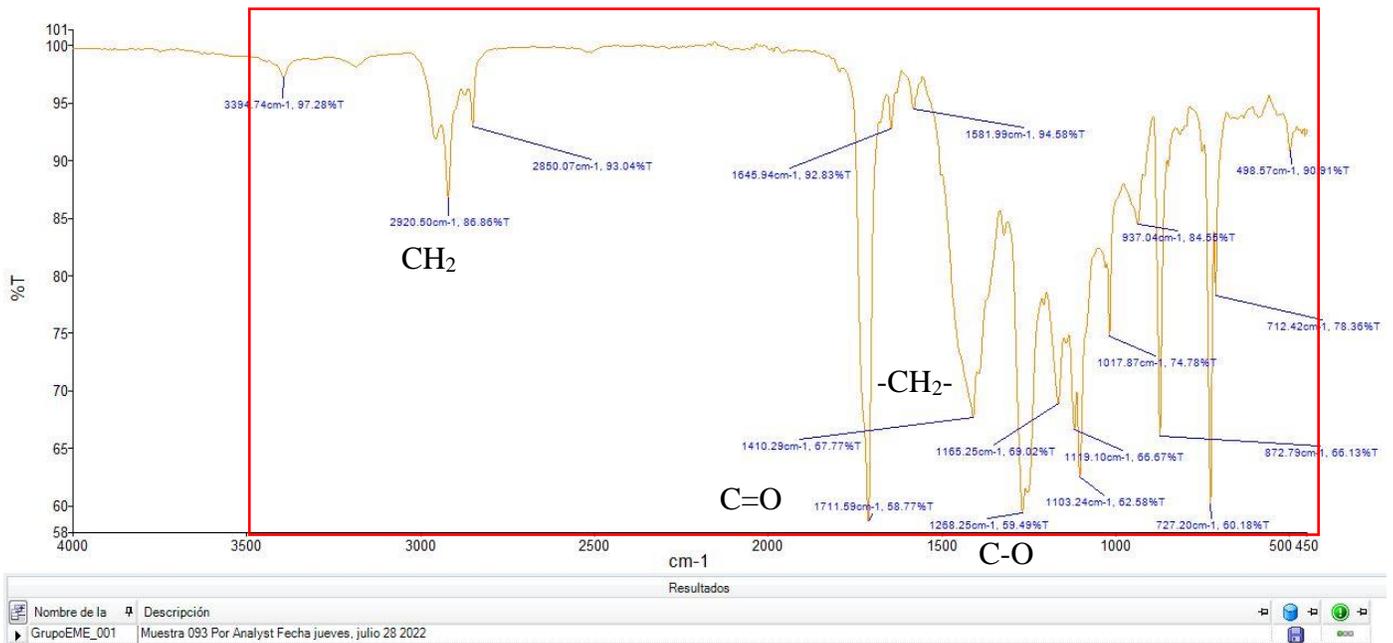
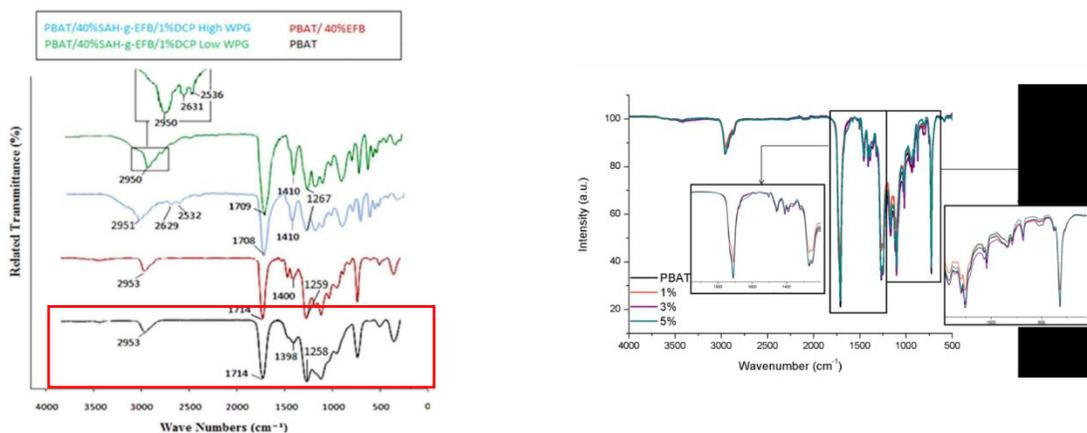


Figura 5.6. Espectro IR de la bolsa etiquetada como compostable de Grupo EME (elaboración propia, 2022)



a. Siyamak et al. (2012)

b. Barbosa et al. (2020)

Figura 5.7. Espectros reportados en la literatura sobre el PBAT

Por último, se encontró que las bolsas del Supermercado, aunque están etiquetadas como compostables bajo la EN 13432 (“Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación”) su espectro demostró que son realmente de polietileno y esto quedó confirmado en la semejanza de su morfología general y en sus picos, estos últimos son prácticamente idénticos a los del espectro del control 1 PDA (Figura 5.8). Es así como los enlaces principales corresponden a C-H en $2,915.39\text{ cm}^{-1}$, C-C en $1,472.68\text{ cm}^{-1}$ y grupo metileno $-\text{CH}_2-$ en 718.75 cm^{-1} .

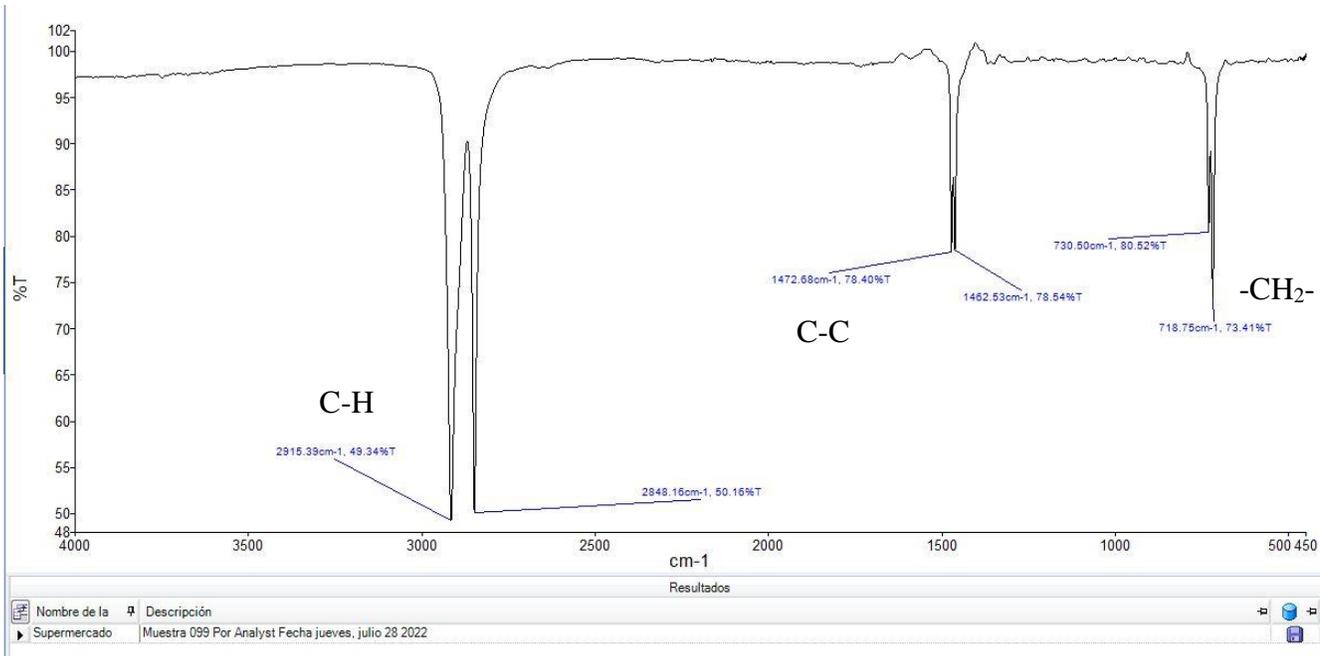


Figura 5.8. Espectro de la bolsa del supermercado similar a la del control 1 (PEAD) (elaboración propia, 2022)

En la Figura 5.9 se pueden observar los espectros de todas las bolsas evaluadas, es evidente el parecido entre las bolsas etiquetadas como compostables en contraste con el control de PEAD y la del supermercado.

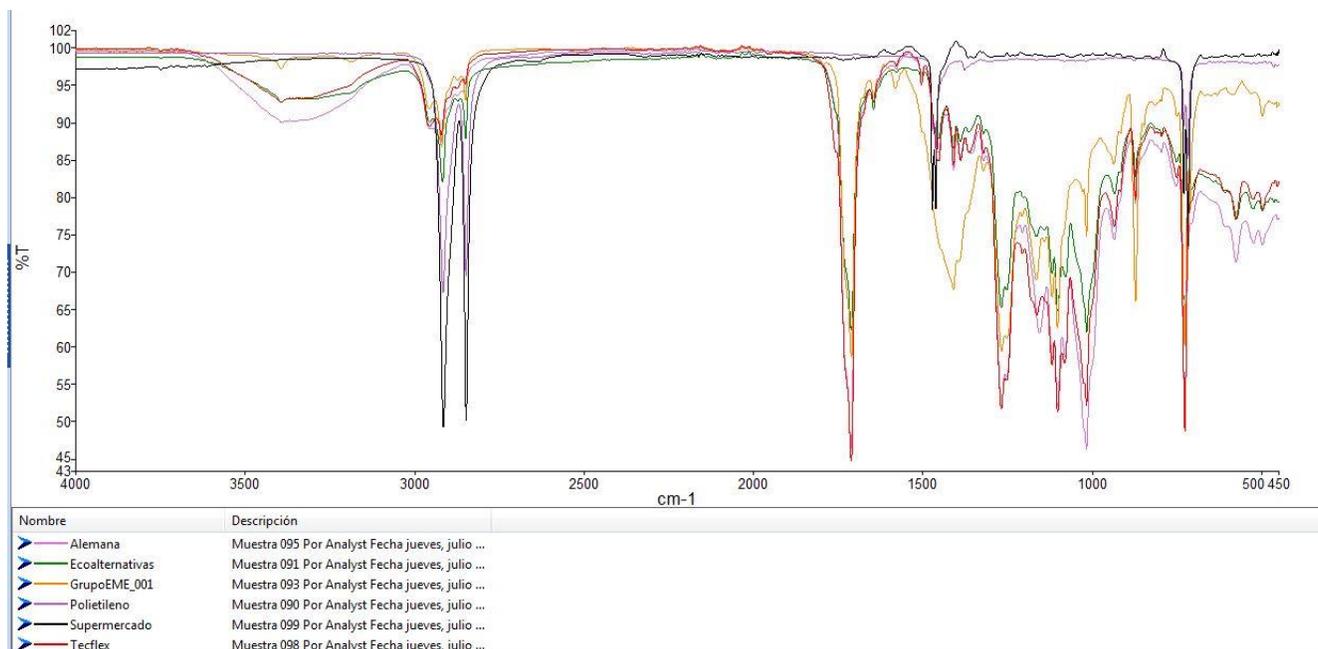


Figura 5.9. Comparación de todos espectros de todas las bolsas evaluadas (elaboración propia, 2022)

5.1.2. Características macro y microscópicas

A simple vista y de manera general, las bolsas muestran solo dobleces típicos, resultado de su almacenaje, sin embargo, no se observa ningún tipo de rasgadura, grieta, orificio o algún otro tipo de desgaste. El control 1, la bolsa de polietileno de alta densidad, es áspero al tacto, claramente es la bolsa más gruesa de todas y la segunda más opaca (Figura 5.10a). El control 2, que corresponde a la bolsa de papel, es la más lisa y suave de todas las bolsas evaluadas pero es la más opaca (Figura 5.10b). En cuanto a la bolsa de Ecoalternativas, es bastante gruesa y tersa al tacto, no presenta texturas, es de color blanco y es muy flexible (Figura 5.10c).

Por otro lado, la bolsa Wentus es un poco más gruesa que la de Ecoalternativas, presenta una coloración verde, es tersa al tacto, no presenta texturas y es menos flexible que la anterior (Figura 5.10d). La bolsa del supermercado es transparente, da una sensación grasosa, menos flexible que las dos anteriores, además es más delgada (Figura 5.10e).

La bolsa de Grupo Eme es muy suave al tacto, de un color blanco translúcido, flexible, sin textura y es la más delgada de todas (Figura 5.10f). Por último, la bolsa de Tecflex tiene un color amarillo translúcido, es bastante delgada, suave al tacto y no presenta texturas (Figura 5.10g).



a. Control 1, PEAD



b. Control 2, Papel



c. Ecoalternativas



d. Wentus



e. Supermercado



f. Grupo EME

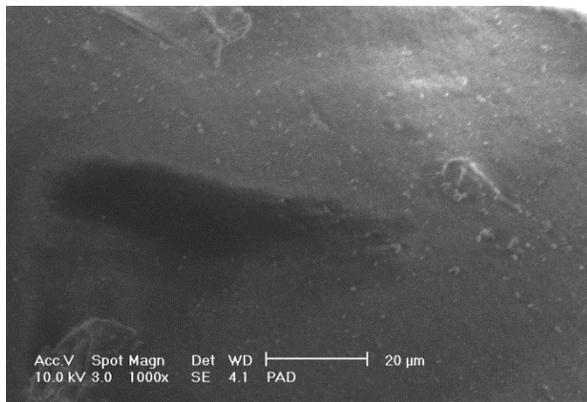


g. Tecflex

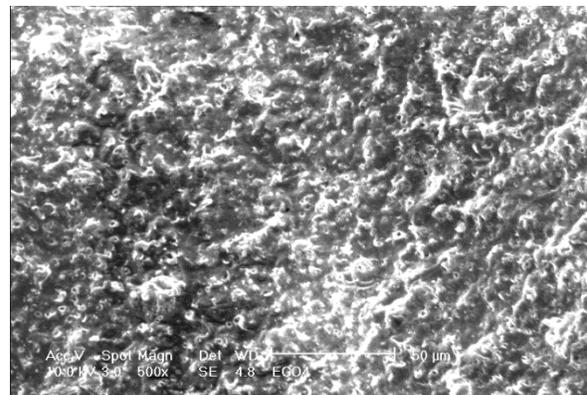
Figura 5.10. Características macroscópicas de las bolsas (elaboración propia, 2022)

Para la evaluación microscópica, las pruebas preliminares fueron realizadas el día 27 de julio de 2022, con una potencia de entre 5 y 10 kV, a tres aumentos a 500x, 800x y 1000x y utilizando un detector de Electrones Secundarios (SE), el cual permite observar la morfología, topografía y textura de las muestras. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

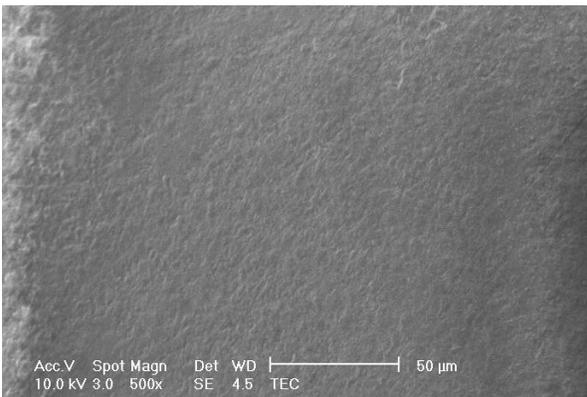
El control de PEAD fue la muestra más difícil de ver al microscopio, se asume que esto se debe al material del que está hecho; en casi toda el área analizada se podían observar manchas alargadas muy oscuras, tal como la que se observa en la Figura 5.11a, sin embargo, no se observan roturas o desgarramientos en el material. En cuanto a la muestra de Ecoalternativas, se observa un patrón muy bien definido a lo largo de la misma, similar al de los arrecifes (Figura 5.11b), sin ninguna alteración del material. Tanto la muestra de Tecflex como la Wentus, presentan un patrón más terso que el de Ecoalternativas (Figuras 5.11c y 5.11d, respectivamente), pero no se observan desgarramientos o roturas en sus materiales. La muestra de Grupo Eme presenta una morfología lenticular y menos tersa que la dos anteriores (Figura 5.11e). Por último, la muestra del Supermercado es la que tiene una morfología más suave que el resto, mostrándose algunas bandas horizontales (Figura 5.11f).



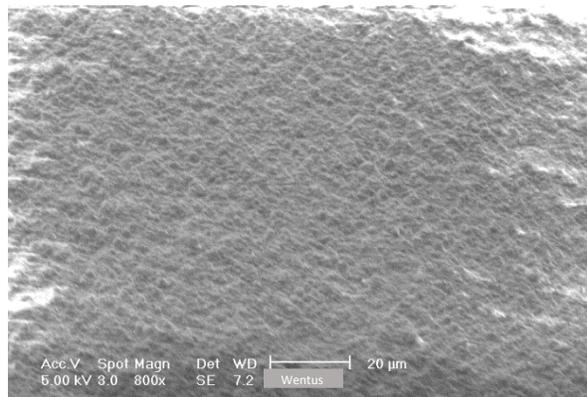
a. PEAD



b. Ecoalternativas

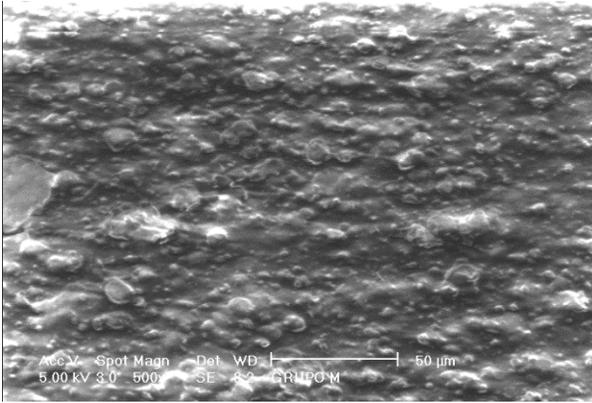


c. Tecflex

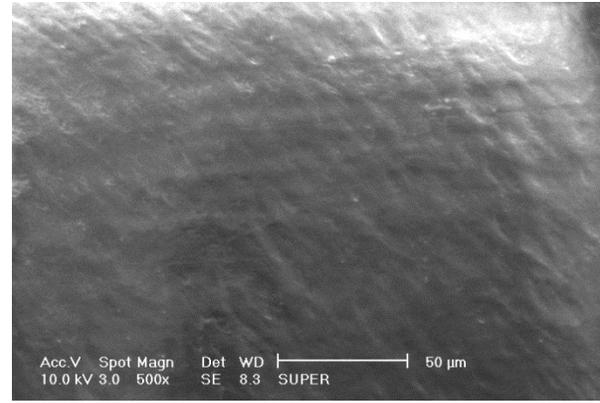


d. Wentus

Figura 5.11. Evidencia microscópica de las bolsas evaluadas (elaboración propia, 2022)



e. Grupo EME



f. Supermercado

Figura 5.11. Evidencia microscópica de las bolsas evaluadas (continuación) (elaboración propia, 2022)

5.1.3. Rendimiento másico

Durante esta etapa de pruebas preliminares se había estipulado utilizar la balanza analítica que se tiene en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, sin embargo, por el espacio, la disposición de las bolsas y el tamaño del plato era una tarea muy difícil de realizar, además, las mediciones no eran del todo acertadas. Por este motivo, se decidió utilizar una balanza digital, que, a pesar de tener solamente dos cifras después del punto, generaban datos más confiables que los obtenidos en primera instancia dentro de la balanza analítica.

El día 28 de julio se llevaron a cabo las pruebas preliminares en las bolsas de plástico etiquetadas como compostables, obteniéndose los datos que se detallan en la Tabla 5.1. Cabe recalcar que las bolsas del Supermercado y Grupo EME tienen masas diferentes debido a que no todas las bolsas son del mismo tamaño, por ello se aclara mes con mes su masa inicial y una vez que se saque del lisímetro, se limpie y se seque.

Tabla 5.1. Registro de las masas preliminares obtenidas de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables, (elaboración propia, 2022)

<i>Clave</i>	<i>Masa inicial (g)</i>
<i>PEAD_0</i>	79.90
<i>Papel_0</i>	38.08
<i>Eco_0</i>	10.55
<i>Tec_0</i>	4.52
<i>Alem_0</i>	9.9

A continuación, en la Figura 5.12 se muestra el proceso de pesaje.



a. Control 1, PEAD



b. Control 2, Papel



c. Ecoalternativas



d. Wentus



e. Tecflex

Figura 5.12. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables (elaboración propia, 2022)

5.1.4. Propiedades mecánicas

Para esta determinación se utilizó, como base principal, la norma ASTM D882, la cual detalla los pasos a seguir para la obtención de las propiedades de tracción en láminas de plástico delgadas. Asimismo, se brindó un sólido apoyo de parte del Dr. Antonio Sánchez Solís y el M.C. Eliezer Hernández Mecinas del Instituto de Investigaciones en Materiales, quienes el día 9 de septiembre

del 2022 realizaron las pruebas correspondientes, obteniendo los resultados que se despliegan en la Tabla 5.2. Se utilizó una máquina de prueba universal de la marca Shimadzu, modelo AGS-X.

Tal como se había visualizado en el espectro, las bolsas del Supermercado tuvieron una resistencia bastante mayor comparada con las demás muestras, inclusive, en algunos parámetros superó al control de polietileno de alta densidad, por lo que se especula que dicho material no es compostable. Por otro lado, las propiedades mecánicas de Ecoalternativas y Grupo Eme son las que más se parecen entre sí denotando una gran diferencia respecto a Tecflex y las bolsas Wentus. Cabe destacar que esta prueba se replicó al concluir el desarrollo experimental, es decir, a los seis meses de observación, con el fin de evaluar su comportamiento y generar conclusiones en cuanto a su degradación.

Por último, en la Figura 5.13 se muestra la gráfica de esfuerzo (MPa) contra deformación (%), en ella, se observa que las bolsas etiquetadas como compostables de Ecoalternativas, Tecflex, Wentus y Grupo Eme tienen un comportamiento similar entre sí, porque requieren menos de 22 MPa para alcanzar una deformación máxima de entre el 25 y 29%, en contraste con las bolsas del Supermercado y el control de PEAD, ya que estas bolsas requieren un esfuerzo mayor a 22 MPa para ser deformadas, alcanzando hasta un 70%.

Tabla 5.2. Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas preliminares realizadas a las bolsas de plástico analizadas (elaboración propia, 2022)

<i>Clave</i>	<i>Módulo elástico, MPa</i>	<i>Máx. esfuerzo, MPa</i>	<i>Máx. desplazamiento, mm</i>	<i>Rotura de esfuerzo, MPa</i>	<i>Rotura de deformación, %</i>	<i>Máx. fuerza, N</i>	<i>Energía, J</i>
<i>PEAD_0</i>	297.858	22.079	59.335	10.768	59.491	40.378	5.935
<i>Eco_0</i>	212.004	9.848	13.086	6.870	26.086	4.1774	0.090
<i>GE_0</i>	221.472	5.935	4.170	4.152	27.295	1.7790	0.042
<i>Tec_0</i>	424.554	16.011	17.753	5.489	25.048	11.9154	0.646
<i>Wentus_0</i>	188.468	21.021	23.907	12.390	29.037	10.023	0.387
<i>Super_0</i>	1075.468	52.896	57.948	34.036	69.541	9.503	0.649

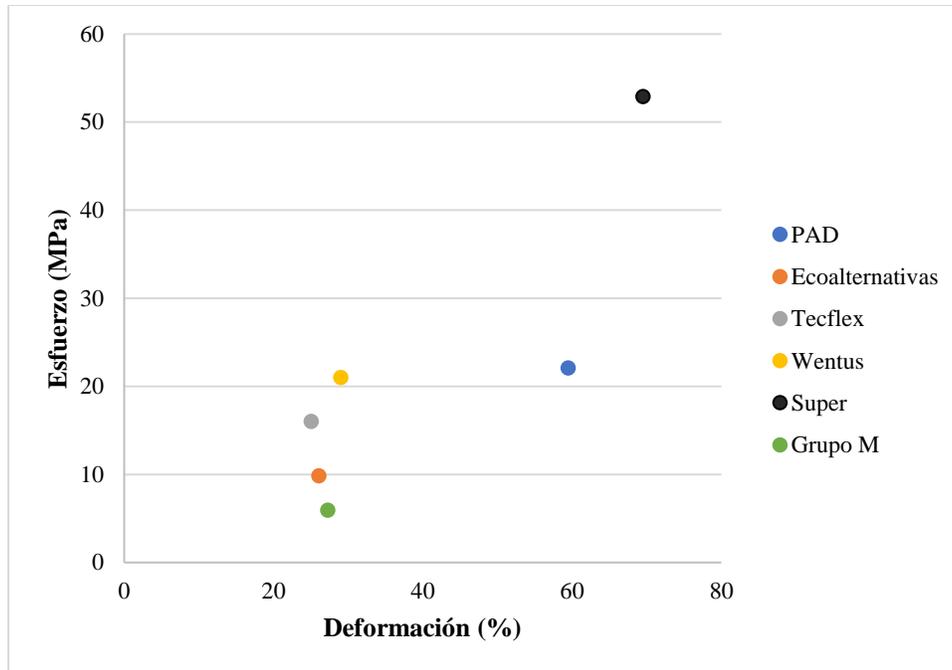


Figura 5.13. Ensayo de tracción inicial de todas las bolsas analizadas (elaboración propia, 2022)

5.1.5. Estimación teórica de lixiviados

Una forma de asegurar el correcto funcionamiento de un relleno sanitario es con la evaluación de los lixiviados producidos a lo largo de su vida útil, analizando parámetros como pH, temperatura, Sólidos Totales, Sólidos Suspendedos Totales, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). De esta forma se tiene un control completo de la operación.

Para el desarrollo experimental, es necesario estimar la cantidad de lixiviado producida, misma que se obtuvo aplicando el método de balance hídrico desarrollado por Thornthwaite (1948), en él, se requiere conocer, entre otros factores, la precipitación pluvial media mensual, la evapotranspiración y el escurrimiento. Las ecuaciones descritas a continuación, forman parte del trabajo de Thornthwaite y fueron utilizadas para obtener la estimación teórica de los lixiviados que se generarían en los lisímetros:

$$P = PERC + EPR + \Delta Hs + Es \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde:

P= Precipitación, en mm de agua

PERC= Percolación, en mm de agua

EPR= Evapotranspiración real, en mm de agua

ΔHs = Cambio en la humedad del suelo para cada mes, en mm de agua

Es= Escurrimiento superficial mensual, en mm de agua

La determinación de las evapotranspiraciones potenciales corregidas se realiza a partir de las temperaturas mensuales promedio, empleando para ello las ecuaciones 5.2 a 5.4:

$$EPj = 16Ka \left(\frac{10 Tj}{I} \right)^a \quad \text{Ec. 5.2}$$

$$ij = \left(\frac{Tj}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} ij \quad \text{Ec. 5.4}$$

Donde:

EPj = Evapotranspiración potencial mensual sin corregir, (mm)

Ka = Constante que depende de la latitud, (adimensional)

Tj = Temperatura media mensual en el mes "j", (°C)

ij = Índice mensual de calor, (adimensional)

I = Sumatoria de los índices mensuales de calor, (adimensional)

j = Número del mes considerado

a = Coeficiente que está en función de la sumatoria de los índices mensuales de calor, (adimensional)

$$a = 679 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.49239$$

Ka , depende de la altitud y del mes del año, por lo que se tienen valores preestablecidos para las latitudes y meses que correspondan, como se indican en Tabla 5.3, este ajuste se debe a que los periodos de insolación varían en función de su cercanía al Ecuador.

Tabla 5.3. Valores de la constante "Ka" para ajustar la evapotranspiración potencial (Thornthwaite, 1948)

<i>Latitud</i>												
<i>en</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
<i>grados</i>												
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
45	1.31	1.10	1.07	0.91	0.81	0.71	0.78	0.90	0.99	1.17	1.26	1.36
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

COEFICIENTES PARA AJUSTAR NO. DE HORAS DE INSOLACIÓN

La evapotranspiración potencial corregida (Ec. 5.5), considera la duración real del mes (d), y el número máximo de horas de sol (N), según la latitud del lugar, mismos que se indican en la Tabla 5.4 (modificada del portal web datos mundial) , entonces, se tiene que:

$$Ep \text{ (corregida)} = Epj(\text{sin corregir}) * \left(\frac{d}{30}\right) * \left(\frac{N}{12}\right) \quad \text{Ec. 5.5}$$

Tabla 5.4. Valores para “d” y “N” (modificada de datosmundial.com, 2022)

<i>Mes</i>	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
No. de días al mes (d)	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
No. máximo de horas de sol (N)	11.08	11.34	12.04	12.38	13.06	13.20	13.14	12.50	12.18	11.45	11.16	11.00

Para la determinación del escurrimiento (Es), por lo regular, se utilizan coeficientes de escurrimiento adimensionales distintos para las épocas de estiaje y lluvia. A continuación, en la Tabla 5.5 se reportan los valores para obtener el coeficiente de escurrimiento.

Tabla 5.5. Valores para obtener Ke (modificada de Aparicio, 2007)

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Ke</i>	
	<i>Estiaje</i>	<i>Lluvia</i>
1.- Arenoso plano (S = 2%)	0.05	0.10
2.- Arenoso con pendiente media (2 <S <7%)	0.10	0.15
3.- Arenoso inclinado (S ≥ 7%)	0.15	0.20
4- Arcilloso plano (S ≤ 2%)	0.13	0.17
5.-Arcilloso con pendiente media (2 <S < 7%)	0.18	0.22
6.- Arcilloso inclinado (S ≥ 7%)	0.23	0.35

El volumen de lluvia escurrido o que escurre, estará en función del volumen de la precipitación pluvial registrada y es posible obtenerlo con la ecuación 5.6:

$$ES = Ke * P \quad \text{Ec. 5.6}$$

Donde:

Es = Escurrimiento superficial mensual, en mm

Ke = Coeficiente de escurrimiento

P = Precipitación mensual, en mm

La capacidad de almacenamiento de humedad del suelo (Hs), representa la cantidad de agua disponible o que puede ser contenida en el suelo, va desde el punto de marchitamiento hasta la capacidad de campo y depende del tipo de suelo que se tenga. En la Tabla 5.6 se mencionan los parámetros para diferentes tipos de suelos.

Tabla 5.6. Capacidad de campo para diferentes tipos de suelos

<i>Tipo De Suelo</i>	<i>Capacidad de campo (Cc) (mm/m)</i>	<i>Punto de marchitamiento (Hy) (mm/m)</i>	<i>Agua disponible (Hs) (mm/m)</i>
Arena Fina	120	20	100
Barro Arenoso	200	50	150
Barro Limoso	300	100	200
Barro Arcilloso	375	125	250
Arcilla	450	150	300

La evapotranspiración real (E_{pr}) representa la cantidad real de humedad perdida durante un mes dado. Para aquellos meses en que $(I_n - E_p) > 0$, la evapotranspiración real no está limitada por la disponibilidad de la humedad del suelo; es decir esta disponibilidad no se verá afectada, por lo que $E_p = E_{pr}$. Para los meses donde $(I_n - E_p) < 0$, la evapotranspiración real está limitada por la disponibilidad de humedad del suelo, siempre y cuando el suelo tenga algunas reservas de agua.

La percolación (Per), se define como el volumen de agua que se puede filtrar al subsuelo y está dado cuando $(I_n - E_p) - \Delta H_s > 0$, siempre que $\Delta H_s \geq 0$.

Para el experimento entonces, se considera que todos los lisímetros poseen una cobertura de tierra (arena fina) debidamente compactada de al menos 5 cm de altura, además, la recopilación de los datos meteorológicos generados en el observatorio meteorológico “Mtro. Francisco Hernández Hernández” de la UNAM, de los cuales se lograron obtener las siguientes medias de temperatura, evapotranspiración y precipitación (Tabla 5.7) y es posible observar, en la Figura 5.14, que la evapotranspiración es mucho mayor a la precipitación, esto puede ser importante para la obtención del lixiviado real. Para obtener la cantidad teórica de lixiviados se utilizó el programa de cálculo Excel® (Microsoft, 2021), por medio del cual se obtuvieron los resultados resumidos en la Tabla 5.8.

Por lo tanto, se espera que se generen, al menos, 15.54 mm de lixiviado de acuerdo con la cobertura de suelo que se colocó en los lisímetros, dato que, multiplicado por el área del recipiente (1.13 m^2) arroja un total de 0.017558 m^3 de lixiviados o 17.558 L que se espera se generen durante la época de lluvias, sin embargo, es importante recalcar que éste sólo es un dato teórico. Por otro lado, es importante recalcar que para obtener los parámetros químicos antes mencionados se requieren por lo menos 500 mL de muestra.

Tabla 5.7. Promedios de evapotranspiración, temperatura y precipitación de los últimos 10 años (Observatorio Meteorológico UNAM, 2022)

<i>Mes (2011-2021)</i>	<i>Evapotranspiración (mm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>
Enero	3.20	13.23	0.15
Febrero	4.36	15.64	0.16
Marzo	5.07	17.17	0.45
Abril	5.48	18.90	0.74
Mayo	5.23	18.03	2.67
Junio	4.18	19.40	4.95
Julio	3.81	18.57	6.51
Agosto	3.86	18.98	6.85
Septiembre	3.42	18.48	6.07
Octubre	3.65	17.39	2.79
Noviembre	3.12	15.32	1.04
Diciembre	3.10	14.27	0.12
Total	48.47	-	32.49

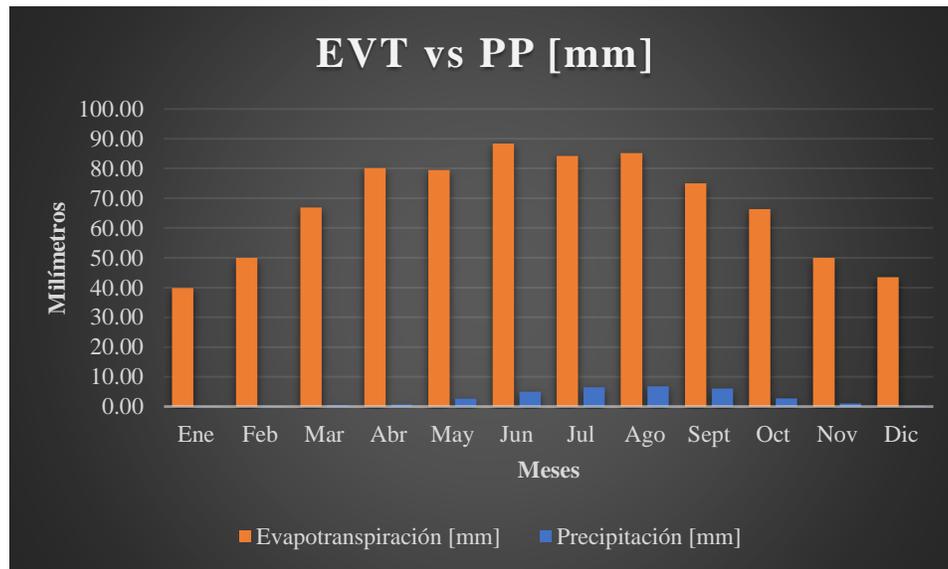


Figura 5.14. Gráfica de la Evapotranspiración contra la Precipitación que se genera en C.U. según el observatorio Meteorológico de la UNAM (elaboración propia, 2022)

Tabla 5.8. Cálculo teórico de la generación de lixiviados (elaboración propia, 2022)

													Cobertura de suelo (m)=	0.05
													Capacidad de campo mm/m=	120
													Capacidad máxima que podrá almacenar el suelo (mm)=	6
													Coefficiente de escurrimiento en época de lluvia (Ke)	0.17
Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total	
Precipitación (mm) P	0.15	0.16	0.45	0.74	2.67	4.95	6.51	6.85	6.07	2.79	1.04	0.12	32.5	
Escurrecimiento (mm) Es=Ke*P	0.0255	0.0272	0.0765	0.1258	0.4539	0.8415	1.1067	1.1645	1.0319	0.4743	0.1768	0.0204	5.525	
Infiltración potencial (mm) In = P-Es	0.1245	0.1328	0.3735	0.6142	2.2161	4.1085	5.4033	5.6855	5.0381	2.3157	0.8632	0.0996		
Evapotranspiración potencial corregida (mm)	39.83	49.96	66.87	80.10	79.47	88.35	84.20	85.14	74.99	66.40	49.96	43.46		
Infiltración real (mm) Ir = In-Ep	-39.70	-49.83	-66.50	-79.49	-77.26	-84.24	-78.80	-79.45	-69.95	-64.09	-49.10	-43.36		
Agua retenida en el suelo (mm) ΔHs	0	0	0	0	0	0	6	6	6	0	0	0	18	
Evaporación real (mm) Epr	0.12	0.13	0.37	0.61	2.22	4.11	5.40	5.69	5.04	2.32	0.86	0.10	26.98	
Lluvia que traspasa la cobertura Per=P-Epr-ΔHs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	4.89	4.84	4.97	0.00	0.00	0.00	15.54	

5.2. Resultados del mes 1 de observación

Es importante recalcar que las bolsas solo fueron lavadas con agua y secadas al sol, esto con el fin de evitar contaminación o adherencia de algún tipo de material que no haya sido propio de las bolsas y de la FORSU incluida.

5.2.1. Análisis por Espectroscopía de IR

A continuación se describen los espectros obtenidos para el primer mes de observación:

En el espectro del control 1 de PEAD (Figura 5.15), no se encontraron grandes cambios con respecto al análisis preliminar, simplemente es observable un rastro de humedad, representado en la concavidad que está distorsionando el espectro y es algo normal, aun cuando la bolsa fue sometida a un secado previo, todas las muestras fueron rellenadas con materiales altamente húmedos y es posible que esta misma humedad quede remanente en el material plástico.

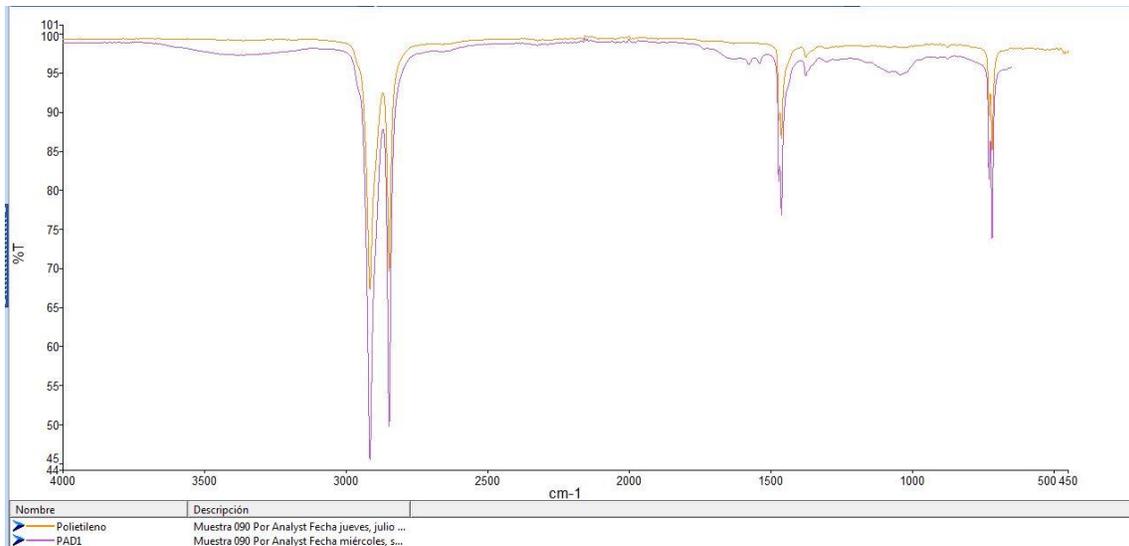


Figura 5.15. Espectro del control 1 PEAD preliminar contra el del primer mes de observación (elaboración propia, 2022)

Para este mes 1 de observación es bastante claro que casi todas las bolsas etiquetadas como compostables (Ecoalternativas, Wentus, Grupo EME y Tecflex) comienzan a presentar un comportamiento muy similar entre sí (Figura 5.16), en lo que realmente difieren es en su porcentaje de transmitancia, sin embargo, la mayoría mantiene estos porcentajes bastante cerca de los preliminares y, de la misma forma, sus enlaces principales se conservan.

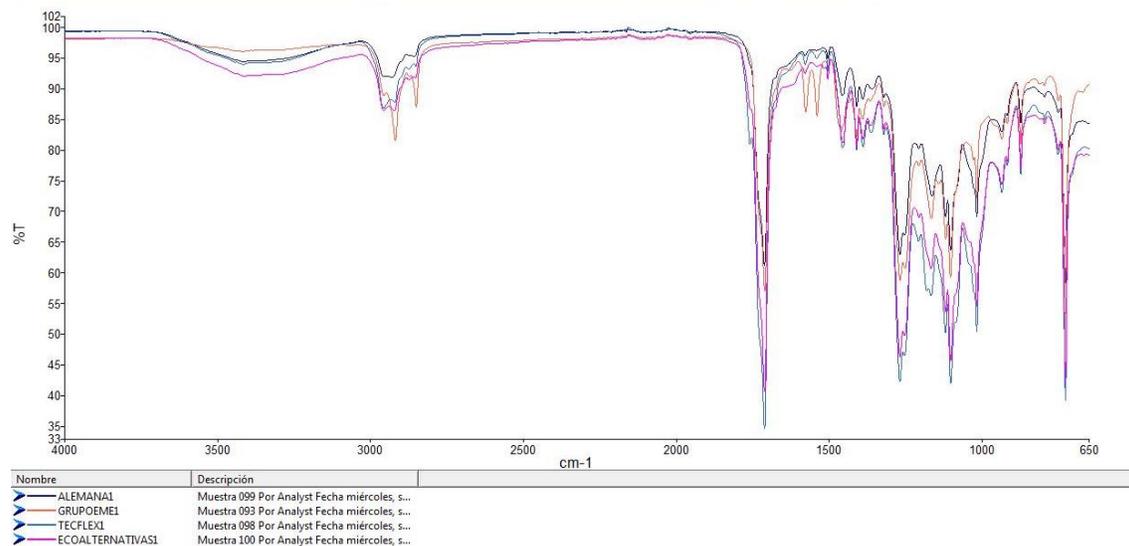


Figura 5.16. Espectros correspondientes al primer mes de observación de las bolsas etiquetadas como compostables Wentus, Grupo Eme, Tecflex y Ecoalternativas (elaboración propia, 2022)

En cuanto a la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado no se registraron cambios significativos en su espectro en comparación con el preliminar, salvo un pequeño ruido observable que puede deberse a la presencia de humedad remanente en la bolsa y que sus picos son más cortos que los observados en su espectro preliminar (Figura 5.17).

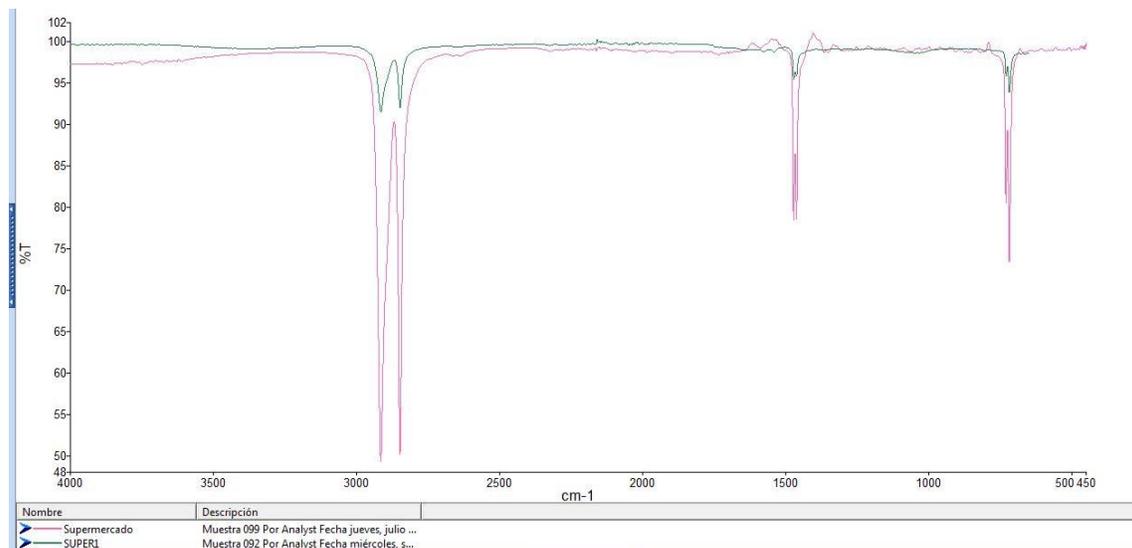


Figura 5.17. Comparación entre el espectro preliminar y el del primer mes de observación de la bolsa etiquetada como compostable Supermercado (elaboración propia, 2022)

5.2.2. Características macro y microscópicas

A simple vista y de manera general, las bolsas presentan un cambio en su color original a un tono más amarillento debido a la disposición de los residuos orgánicos, además de algunas roturas debido a la fricción entre los residuos y las paredes de las bolsas.

Sobre la bolsa control de polietileno de alta densidad no se presentan cambios reales y palpables a simple vista, salvo los dobleces y arrugas comunes en una bolsa que estuvo amarrada con un nudo por un mes (Figura 5.18a). En cuanto al control de papel, como era de esperarse, se fragmentó en su totalidad, lo que dificultó que se pudiera recolectar algún pedazo sin romperse (Figura 5.18b).

Por otro lado, la bolsa de Ecoalternativas presenta un cambio en su coloración original a un tono amarillento y un desgaste en algunas zonas debido a la fricción evidenciado por algunos agujeros y roturas menores (Figura 5.18c). Sobre la bolsa de Grupo Eme, pasó de un color blanco brillante a un sepia amarillento con algunas roturas evidentes (Figura 5.18d).

La bolsa Wentus tuvo un cambio de color tenue, de verde claro a un verde más oscuro y en algunas zonas marrón, también presentó agujeros pero en menor proporción que las anteriores (Figura 5.18e). La bolsa de Tecflex realmente no tuvo mucho cambio en cuanto a su color

solamente se oscureció un poco más, no presentó desgaste de ningún tipo (Figura 5.18f). Por último, la bolsa del supermercado solamente tuvo un cambio ligero de color con un tono amarillento muy tenue, no se encontraron evidencias de desgaste a nivel macroscópico (Figura 5.18g).



a. Control 1, PEAD



b. Control 2, Papel



c. Ecoalternativas



d. Grupo Eme



e. Wentus



f. Tecflex

Figura 5.18. Características macroscópicas de las bolsas después de un mes de observación (elaboración propia, 2022)



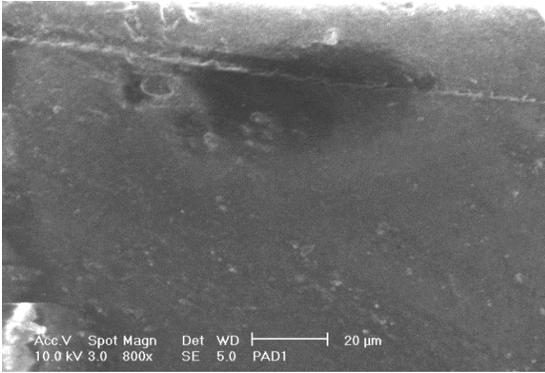
g. Supermercado

Figura 5.18. Características macroscópicas de las bolsas después de un mes de observación (continuación) (elaboración propia, 2022)

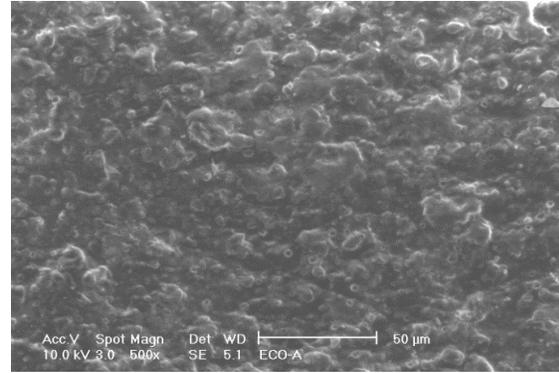
En cuanto al análisis microscópico, en la Figura 5.19 se observan las fotografías que se pudieron generar en el microscopio electrónico de barrido.

De la misma forma que en el análisis preliminar, el control de PEAD fue la muestra más complicada de analizar al microscopio, sobre todo a la hora de enfocarla, pues al tratar de conseguir un espacio donde se pudiera ver bien, la muestra comenzaba a mostrar signos del bombardeo de electrones y dificultaba aún más el enfoque, sin embargo, al final se logró obtener una buena imagen. En casi toda el área analizada se podían observar manchas alargadas muy oscuras, tal como la que se observa en la Figura 5.19a, sin embargo, aunque ya ha pasado un mes dentro del lisímetro no se observan roturas o desgarramientos en el material. La muestra de Ecoalternativas, conservó un patrón muy bien definido a lo largo de la misma, similar al de los arrecifes (Figura 5.19b), pero no presentó ninguna alteración del material. En cuanto a la muestra de Tecflex, se observaron algunas líneas bastante marcadas que no se habían visto en el análisis preliminar que pueden ser producto del amarre y dobleces a las que fueron sometidas durante su relleno y disposición (Figura 5.19c). Para la muestra Wentus, no se observó un cambio significativo en su morfología (Figura 5.19d), mucho menos alguna muestra de desgaste.

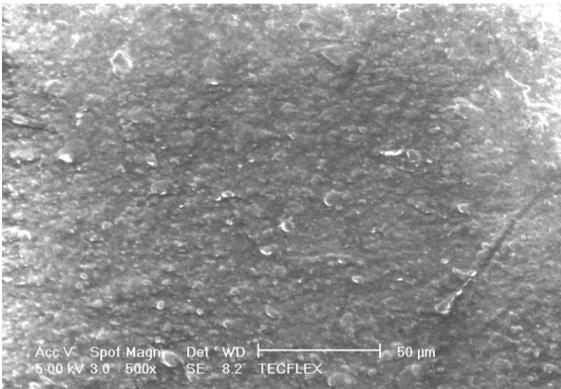
Por su parte, la muestra de Grupo Eme continuó presentando la misma morfología lenticular que en el análisis preliminar, sin ninguna rotura o desgarramiento (Figura 5.19e). Por último, la muestra del Supermercado continuó siendo la más suave de todas, además, se observaron algunas líneas cruzadas, que pudieron ser generadas durante el amarre y disposición de la bolsa (Figura 5.19f).



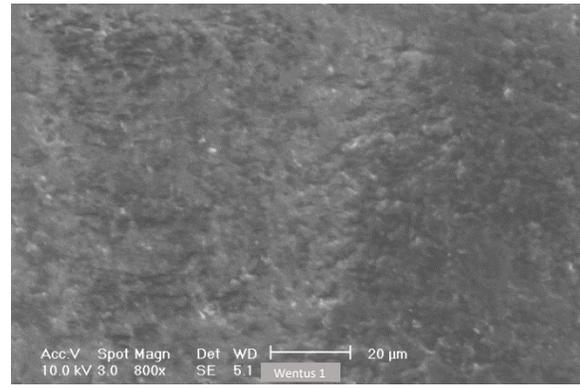
a. PEAD



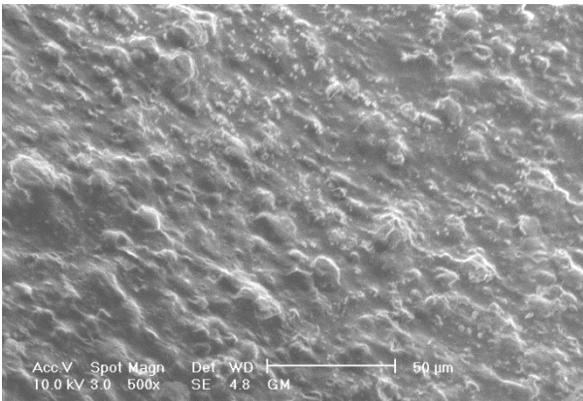
b. Ecoalternativas



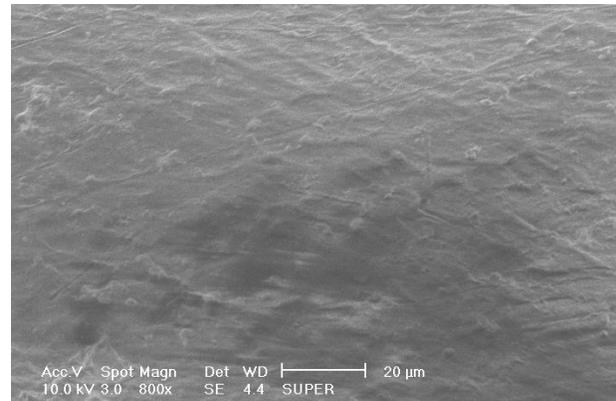
c. Tecflex



d. Wentus



e. Grupo EME



f. Supermercado

Figura 5.19. Evidencia microscópica de las bolsas evaluadas después del primer mes de observación (elaboración propia, 2022)

5.2.3. Rendimiento másico

El día 15 de agosto se llevaron a cabo las pruebas en las bolsas de plástico etiquetadas como compostables recolectadas después del primer mes de observación, obteniéndose los datos que se detallan en la Tabla 5.9. Cabe destacar que al no haber podido recolectar el control de papel no se menciona su peso.

Tabla 5.9. Registro de las masas al mes 1 obtenidas de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables (elaboración propia, 2022)

<i>Clave</i>	<i>Masa inicial (g)</i>	<i>Masa mes 1 (g)</i>
<i>PEAD_1</i>	79.90	79.43
<i>Eco_1</i>	10.55	9.54
<i>GE_1</i>	7.42	7.30
<i>Tec_1</i>	4.51	4.51
<i>Alem_1</i>	9.9	9.63
<i>Super_1</i>	6.35	6.34

A continuación, en la Figura 5.20 se muestra el proceso de pesaje.



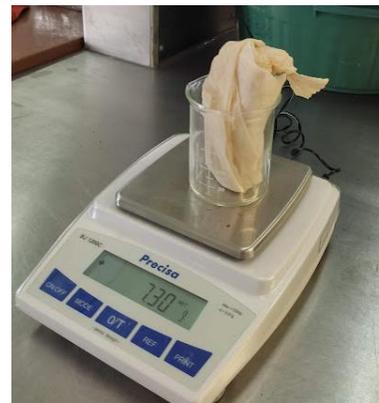
a. Control 1, PEAD



b. Ecoalternativas



c. Wentus



d. Grupo Eme

Figura 5.20. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después del primer mes de observación (elaboración propia, 2022)



e. Supermercado



f. Tecflex

Figura 5.20. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después del primer mes de observación (continuación) (elaboración propia, 2022)

5.2.4. Resultados de los análisis a los lixiviados

Debido a las limitantes en cuanto a materiales y personal en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental se decidió contratar al Laboratorio de Calidad de Agua y Residuos de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, de tal manera que no se comprometieran los tiempos y calendarios para la parte experimental que realmente importa en la tesis, el análisis de la degradación de las bolsas.

De esta forma, el día 15 de agosto se recolectaron los lixiviados del lisímetro 1, mediante un recipiente de plástico con capacidad de 500 mL (Figura 5.21), mismo que fue identificado y preservado como especifica la normativa y fue llevado al laboratorio de Calidad del Agua y Residuos de la UAM Azcapotzalco para su determinación.



Figura 5.21. Recolección de los lixiviados en el lisímetro 1

A continuación, en la Tabla 5.10 se despliegan los resultados de los análisis realizados.

Tabla 5.10. Resultados obtenidos a partir de la muestra de lixiviados recolectada del lisímetro 1 (UAM, 2022)

<i>Parámetro</i>	<i>Método aplicado</i>	<i>Resultado (mg/L)*</i>
<i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)</i>	NMX-AA-028-SCFI-2001	6,350.00
<i>pH</i>	-	5.12**
<i>Conductividad</i>	-	13.88µS
<i>Temperatura</i>	-	24.90°C
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	MX-AA-030/2-SCFI-2011	10,600.00
<i>Sólidos Totales (ST)</i>	NMX-AA-034-SCFI-2015	6,132.80
<i>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</i>	NMX-AA-034-SCFI-2015	731.25

*donde no se indique lo contrario

**sin unidades

Al ser el primer mes de observación estos resultados permitieron tener una idea de cómo debían comportarse los lixiviados a lo largo del experimento y, al final de éste, poder comparar los resultados obtenidos.

5.3. Resultados del mes 2 de observación

5.3.1. Análisis por Espectroscopía de IR

A continuación se describen los espectros obtenidos después de concluir el segundo mes de observación:

En el espectro del control de PEAD no se encontraron grandes cambios con respecto al análisis preliminar (Figura 5.22), pero existe un rastro de humedad, representada en la concavidad que está distorsionando el espectro, algo normal en este tipo de experimentos, ya que todas las muestras fueron rellenadas con materiales altamente húmedos y es posible que esta misma humedad quede remanente en el material plástico, pero, a grandes rasgos, el espectro ha conservado tanto su forma como sus picos preliminares, sólo ha variado un poco en el porcentaje de transmitancia.

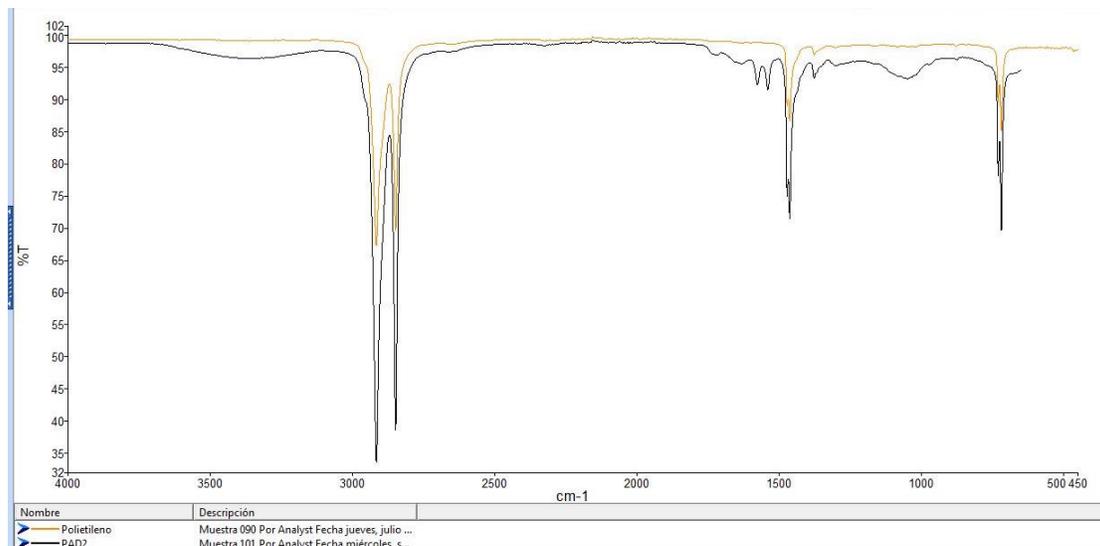


Figura 5.22. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al segundo mes de observación del control de PEAD (elaboración propia, 2022)

Después de concluir el segundo mes de observación, es aún más evidente la similitud entre los espectros de las bolsas etiquetadas como compostables (Ecoalternativas, Wentus, Grupo EME y Tecflex) (Figura 5.23), asimismo, a grandes rasgos, los valores de transmitancia con respecto a la longitud de onda se han mantenido bastante cercanos unos de otros y, por último, los picos que denotan sus enlaces principales se han conservado.

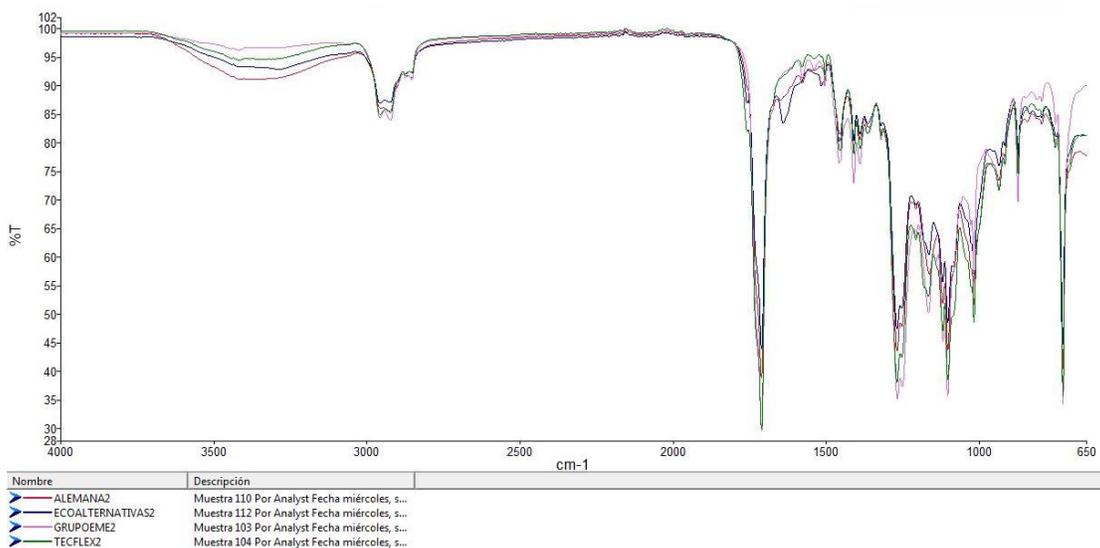


Figura 5.23. Espectros correspondientes al segundo mes de observación de las bolsas etiquetadas como compostables Ecoalternativas, Wentus, Grupo Eme y Tecflex (elaboración propia, 2022)

En cuanto a la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado, de la misma forma que el mes anterior, no se ha notado un cambio significativo en su espectro, salvo un pequeño ruido observable que, probablemente, se deba a la presencia de humedad remanente en la bolsa (Figura 5.24), pero en su mayoría ha conservado su forma, porcentajes de transmitancia y sus picos principales.

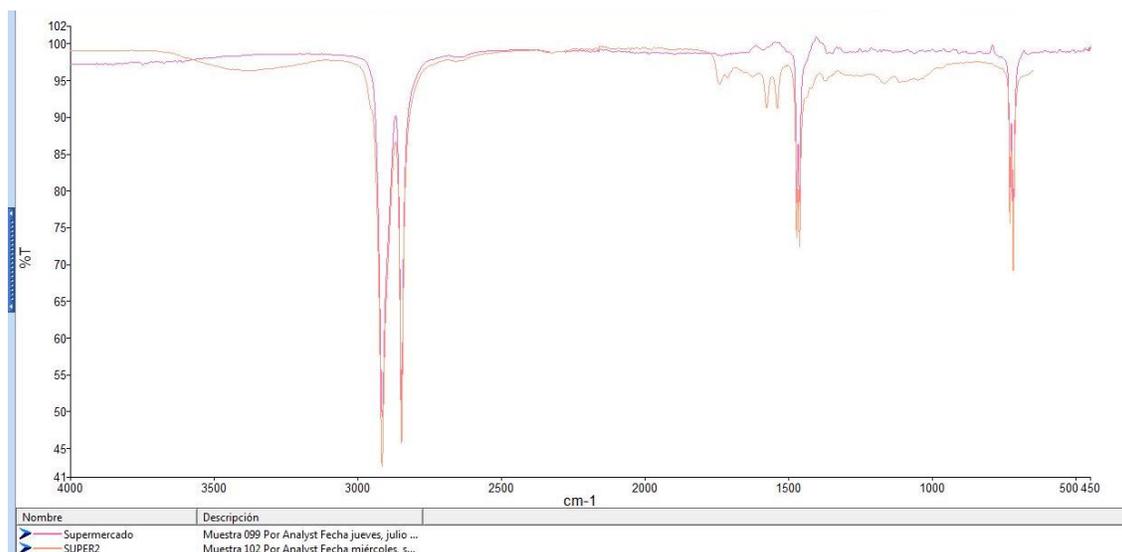


Figura 5.24. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al segundo mes de observación de la bolsa de supermercado (elaboración propia, 2022)

5.3.2. Características macroscópicas

Es importante destacar que debido a que no se pudieron drenar los lixiviados del lisímetro 2 se tomó la decisión de usar el lisímetro 3, por ello las bolsas tienen los códigos 03. Sin embargo sí fueron recolectadas al segundo mes.

A simple vista y de manera general, las bolsas presentaron un cambio en su color original a un tono más amarillento debido a la presencia de los residuos orgánicos, además de algunas roturas que probablemente se deben a la fricción entre los residuos y las paredes de las bolsas.

De la misma forma que el mes anterior, no se encontraron cambios significativos en la bolsa control de polietileno de alta densidad, salvo los dobleces y arrugas comunes que se esperan de una bolsa que estuvo amarrada con un nudo por dos meses (Figura 5.25a). Asimismo, el control de papel tuvo un comportamiento todavía más inestable que en el mes anterior, pues se encontraron sólo pequeños fragmentos, lo que dificultó su recolección (Figura 5.25b).

Por otro lado, la bolsa de Ecoalternativas presentó un cambio en su coloración original a un tono más amarillento además de algunos agujeros y roturas menores (Figura 5.25c). Sobre la bolsa de

Grupo Eme, se tuvo un cambio en su coloración a un sepia amarillento con algunas roturas evidentes (Figura 5.25d). La bolsa Wentus tuvo un cambio de color un poco más pronunciado que el mes anterior, de verde claro a un sepia, también presentó algunos agujeros menores (Figura 5.25e). La bolsa de Tecflex se oscureció un poco más, pero no presentó desgaste de ningún tipo (Figura 5.25f). Por último, en la bolsa del Supermercado solamente se vio un cambio ligero de color a un transparente amarillento sin encontrar evidencia de desgaste (Figura 5.25g).



a. Control 1, PEAD



b. Control 2, Papel



c. Ecoalternativas



d. Grupo Eme



e. Wentus



f. Tecflex

Figura 5.25. Características macroscópicas de las bolsas después de dos meses de observación (elaboración propia, 2022)



g. Supermercado

Figura 5.25. Características macroscópicas de las bolsas después de dos meses de observación (continuación) (elaboración propia, 2022)

5.3.3. Rendimiento másico

El día 14 de septiembre se llevaron a cabo las pruebas en las bolsas de plástico etiquetadas como compostables recolectadas después de 2 meses de observación, obteniéndose los datos que se detallan en la Tabla 5.11. Cabe destacar que al no haber podido recolectar el control de papel no se menciona su peso.

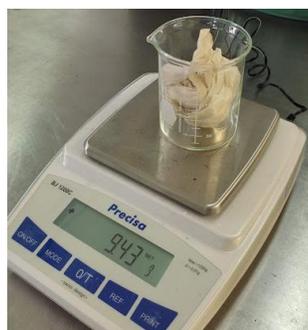
Tabla 5.11. Registro de las masas obtenidas de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de dos meses de observación, (elaboración propia, 2022)

<i>Clave</i>	<i>Masa inicial (g)</i>	<i>Masa al mes 2 (g)</i>
<i>PEAD_2</i>	79.90	79.38
<i>Eco_2</i>	10.55	9.43
<i>GE_2</i>	8.92	8.43
<i>Tec_2</i>	4.51	3.94
<i>Alem_2</i>	9.9	9.63
<i>Super_2</i>	2.89	2.87

A continuación, en la Figura 5.26 se muestra el proceso de pesaje.



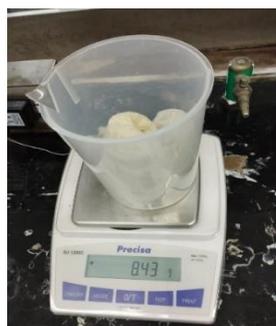
a. Control 1, PEAD



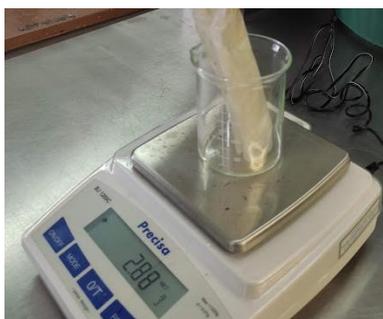
b. Ecoalternativas



c. Wentus



d. Grupo Eme



e. Supermercado



f. Tecflex

Figura 5.26. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de dos meses de observación (elaboración propia, 2022)

5.3.4. Resultados de los análisis a los lixiviados

El día 7 de septiembre fueron recolectados los lixiviados correspondientes al segundo mes de observación, mediante un recipiente de plástico con capacidad de 500 mL (Figura 5.27), mismo que fue identificado y preservado como especifica la normativa y después fue llevado al Laboratorio de Calidad del Agua y Residuos de la UAM Azcapotzalco para su determinación.



Figura 5.27. Recolección de los lixiviados en el lisímetro 2, (elaboración propia, 2022)

A continuación, en la Tabla 5.12 se despliegan los resultados de los análisis realizados. Como se puede observar, los valores de todos los parámetros tienen una mayor concentración que el mes anterior, lo que nos indica que los lixiviados están madurando y se está corroborando que el funcionamiento del experimento es el adecuado.

Tabla 5.12. Resultados obtenidos a partir de la muestra de lixiviados recolectada del lisímetro 2, (UAM, 2022)

<i>Parámetro</i>	<i>Método aplicado</i>	<i>Resultado (mg/L)*</i>
<i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)</i>	NMX-AA-028-SCFI-2001	19,715.00
<i>pH</i>	-	5.26**
<i>Conductividad</i>	-	18.29 μ S
<i>Temperatura</i>	-	25°C
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	MX-AA-030/2-SCFI-2011	27,907.00
<i>Sólidos Totales (ST)</i>	NMX-AA-034-SCFI-2015	14,885.20
<i>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</i>	NMX-AA-034-SCFI-2015	1283.50

*donde no se indique lo contrario

**sin unidades

Desafortunadamente, éste fue el último mes en el que se pudo obtener una cantidad adecuada de lixiviado para su análisis, esto se debió a que, como se mostró en la determinación teórica de los lixiviados, la evapotranspiración es muchísimo mayor que la precipitación que se genera en el sitio de estudio, esto aunado a la pequeña cantidad de agua que se pudo infiltrar y al poco líquido generado por los residuos dio como resultado una proporción insuficiente de lixiviado para hacer las determinaciones, por lo que no se le pudo dar seguimiento a esta parte. Sin embargo, como se comentó anteriormente, este punto sólo se evaluaría de ser posible y el que no exista lixiviado no afecta en nada los resultados de esta tesis.

5.4. Resultados del mes 3 de observación

5.4.1. Análisis por Espectroscopía de IR

A continuación se describen los espectros obtenidos después de haber concluido el tercer mes de observación:

En el espectro del control de PEAD no se encontraron grandes cambios con respecto al análisis preliminar, simplemente se observa un rastro muy insignificante de humedad, misma que está representada en la concavidad que distorsiona el espectro, sin embargo, a grandes rasgos se han conservado su forma original y sus picos principales (Figura 5.28).

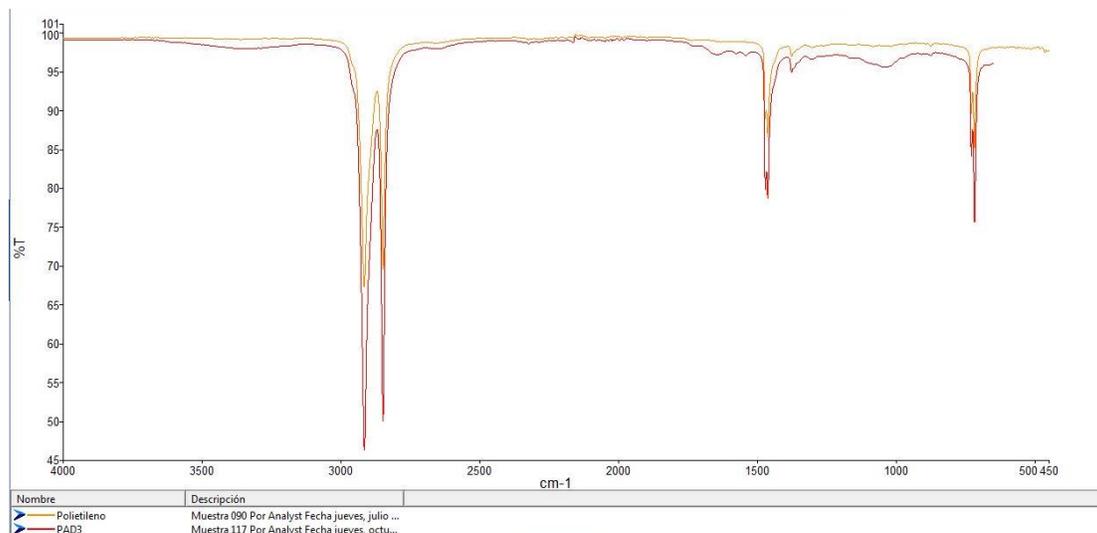


Figura 5.28. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al tercer mes de observación del control de PEAD (elaboración propia, 2022)

En el espectro correspondiente a las bolsas etiquetadas como compostables de Ecoalternativas, Wentus y Tecflex se observó un comportamiento bastante similar entre sí, con ligeras variaciones en los porcentajes de transmitancia, pero han conservado, de manera general, su morfología original y sus picos principales (Figura 5.29). Por otro lado, en la bolsa de Grupo Eme, se observó una ligera variación, específicamente en el pico de 1,409.74 y correspondiente a -CH₂, mismo que había sido visible en el análisis preliminar pero que en los dos meses pasados era casi imperceptible, esto probablemente pueda deberse a un tema de concentraciones y que puede ir de la mano con la calidad en la fabricación de la película plástica.

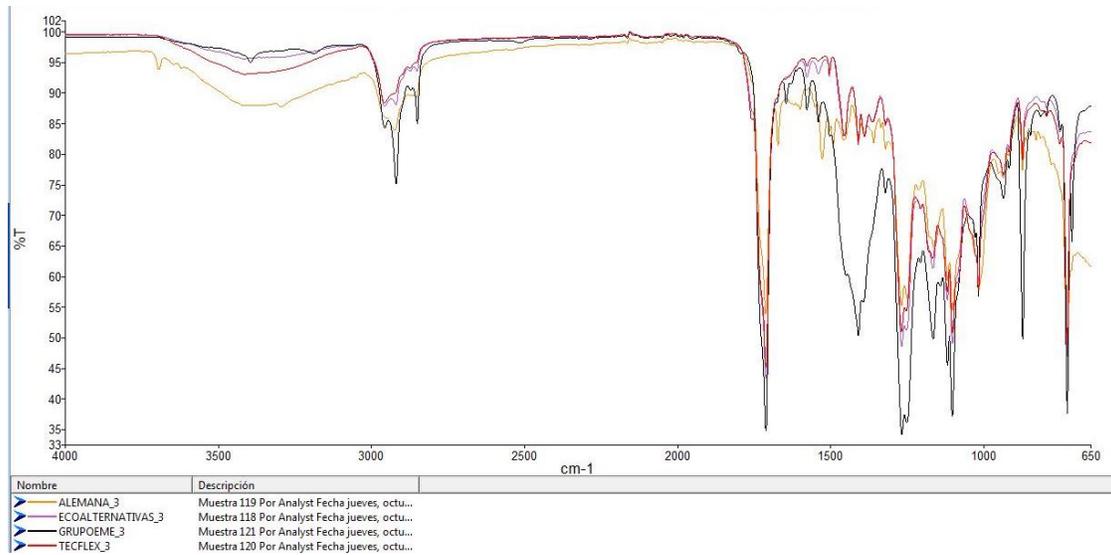


Figura 5.29. Espectros correspondientes al tercer mes de observación de las bolsas etiquetadas como compostables Ecoalternativas, Wentus, Grupo EME y Tecflex (elaboración propia, 2022)

En cuanto a la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado se han notado algunos cambios con respecto al espectro preliminar pero que se atribuyen completamente a la presencia de humedad en la bolsa (concavidad en el espectro) y que genera el desfase y la distorsión del espectro pero que, de manera general, muestra el mismo comportamiento que se ha visto a lo largo de todo el experimento, conservando los picos principales (Figura 5.30).

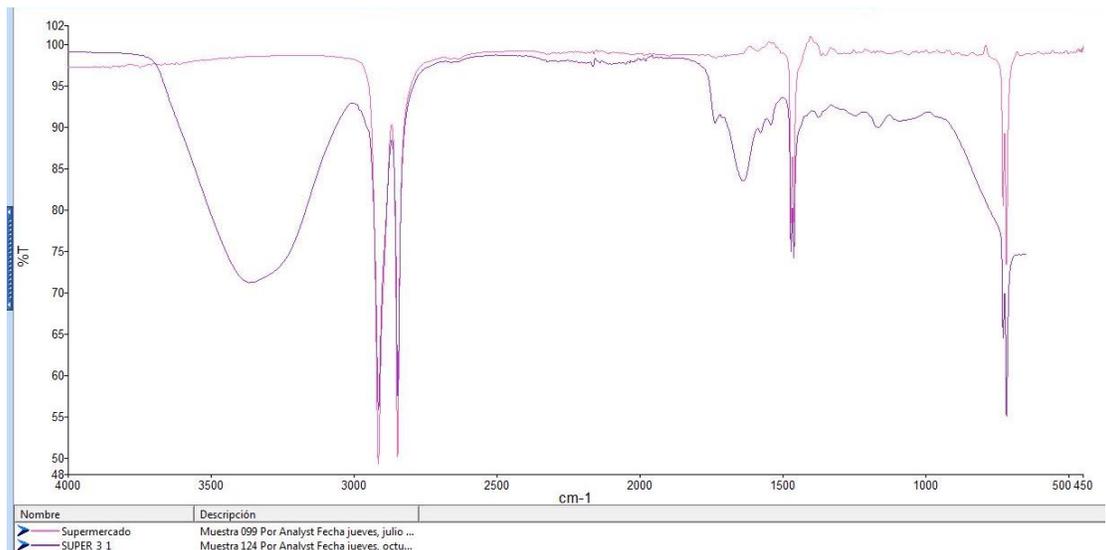


Figura 5.30. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al tercer mes de observación de la bolsa del Supermercado, (elaboración propia, 2022)

5.4.2. Características macroscópicas

Es importante destacar que debido a que no se pudo drenar los lixiviados salvo del lisímetro 6, se tomó la decisión de elegir éste como el lisímetro correspondiente al tercer mes de observación y es por esta razón que los códigos que aparecen en las fotografías tienen la terminación 06, sin embargo, los materiales plásticos sí fueron extraídos de los lisímetros al tercer mes de observación.

Durante este mes, la mayoría de las bolsas (PEAD, Ecoalternativas, Wentus y Supermercado) tuvieron mínimos cambios a excepción de dobleces y cambio en la coloración a un tono más amarillento y marrón, sin embargo, las bolsas de Tecflex y Grupo Eme sufrieron un desgaste considerable, que será descrito con más detalle a continuación.

Al igual que en los dos meses anteriores, para el control 1 de PEAD no se encontraron cambios reales, solamente dobleces y arrugas comunes que se esperan de una bolsa que estuvo amarrada con un nudo por meses (Figura 5.31a). Y como ha ocurrido en los meses anteriores, el control de papel se ha desintegrado casi en su totalidad, lo poco que se podía ver se deshacía al intentar sacarlo del lisímetro (Figura 5.31b).

La bolsa de Ecoalternativas presentó un cambio en su coloración original a un tono entre amarillento y marrón, cabe destacar que este ejemplar no presentaba grietas o agujeros generados por la fricción de los residuos, estaba casi intacta (Figura 5.31c). Por otro lado, la bolsa de Grupo Eme tuvo una pérdida importante de material, como se observa en la Figura 5.31d, la bolsa presenta numerosos agujeros y de gran tamaño, además de un cambio en la coloración a un tono más marrón.

La bolsa Wentus tuvo un cambio de color un poco más pronunciado en la parte inferior, entre amarillo y café, además presentó un desgaste menor en el centro de la bolsa (Figura 5.31e). En cuanto a la bolsa de Tecflex, ésta también tuvo una pérdida importante de material y un desgaste bastante notorio, se abrió a la mitad de la bolsa y además, presentó una coloración bastante marcada, entre café y marrón (Figura 5.31f).

Por último, la bolsa del supermercado se tuvo que abrir por otro lado para poder limpiarla ya que estaba muy bien amarrada, es en esta parte del nudo donde se observó un cambio ligero de color, pero en general está intacta (Figura 5.31g).



a. Control 1, PEAD



b. Control 2, Papel



c. Ecoalternativas



d. Grupo Eme



e. Wentus



f. Tecflex

Figura 5.31. Características macroscópicas de las bolsas después de tres meses de observación (elaboración propia, 2022)



g. Supermercado

Figura 5.31. Características macroscópicas de las bolsas después de tres meses de observación (continuación) (elaboración propia, 2022)

5.4.3. Rendimiento másico

Se generaron algunos inconvenientes dentro del posgrado debido al paro de actividades, es por ello que esta determinación se llevó a cabo hasta el 19 de octubre, obteniéndose los datos que se detallan en la Tabla 5.13. Cabe destacar que al no haber podido recolectar el control de papel no se menciona su peso.

Tabla 5.13. Registro de las masas obtenidas de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de tres meses de observación, (elaboración propia, 2022)

<i>Clave</i>	<i>Masa inicial</i> (g)	<i>Masa mes 3</i> (g)
<i>PAD_3</i>	79.90	79.21
<i>Eco_3</i>	10.55	9.28
<i>GE_3</i>	5.36	3.99
<i>Tec_3</i>	4.12	3.73
<i>Alem_3</i>	9.9	9.61
<i>Super_3</i>	3.65	3.63

A continuación, en la Figura 5.32 se muestra el proceso de pesaje.



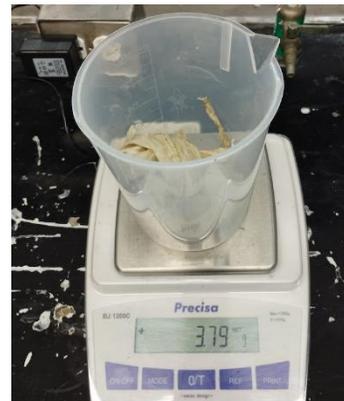
a. Control 3, PEAD



b. Ecoalternativas



c. Wentus



d. Grupo Eme



e. Supermercado



f. Tecflex

Figura 5.32. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de tres meses de observación (elaboración propia, 2022)

5.4.4. Resultados de los análisis a los lixiviados

El día 7 de octubre se intentó recolectar los lixiviados correspondientes al tercer mes de observación, al principio, se eligió este lisímetro debido a que fue el único que al abrir la válvula como usualmente se hace y comenzó a salir el líquido, sin embargo, solamente se lograron recolectar aproximadamente 5 mL, por lo que se procedió a sacar todas las muestras de bolsas de

plástico etiquetadas como compostables y ver si se había tapado la válvula pero no se encontraron restos de lixiviado (Figura 5.33), pero no había presencia de líquido dentro del lisímetro, por lo tanto no se pudo realizar ninguna determinación, pues el lixiviado no era suficiente para ello.



Figura 5.33. Evidencia de la nula presencia de más lixiviado dentro del lisímetro 3, (elaboración propia, 2022)

5.5. Resultados del mes 4 de observación

5.5.1. Análisis por Espectroscopía de IR

En los siguientes párrafos se explica a detalle lo observado en el cuarto mes de experimentación, así como los datos obtenidos.

Para el espectro del control de PEAD no se han encontrado grandes cambios con respecto al análisis preliminar, como se ha mencionado en los meses anteriores, solamente es notoria una pequeña distorsión en el espectro que puede traducirse en la presencia de humedad remanente, ya que, en general, el espectro conserva tanto su forma original como sus picos principales (Figura 5.34).

Los espectros de las bolsas etiquetadas como compostables Ecoalternativas, Wentus, Grupo Eme y Tecflex (Figura 5.35) han mantenido bastante similitud con el mes anterior aunque ahora sólo es visible hasta la banda de 650 cm^{-1} , es notorio el parecido en la morfología general de todos los espectros, sus porcentajes de transmitancia son bastante similares entre sí y en comparación al análisis preliminar, además de la conservación de sus picos principales.

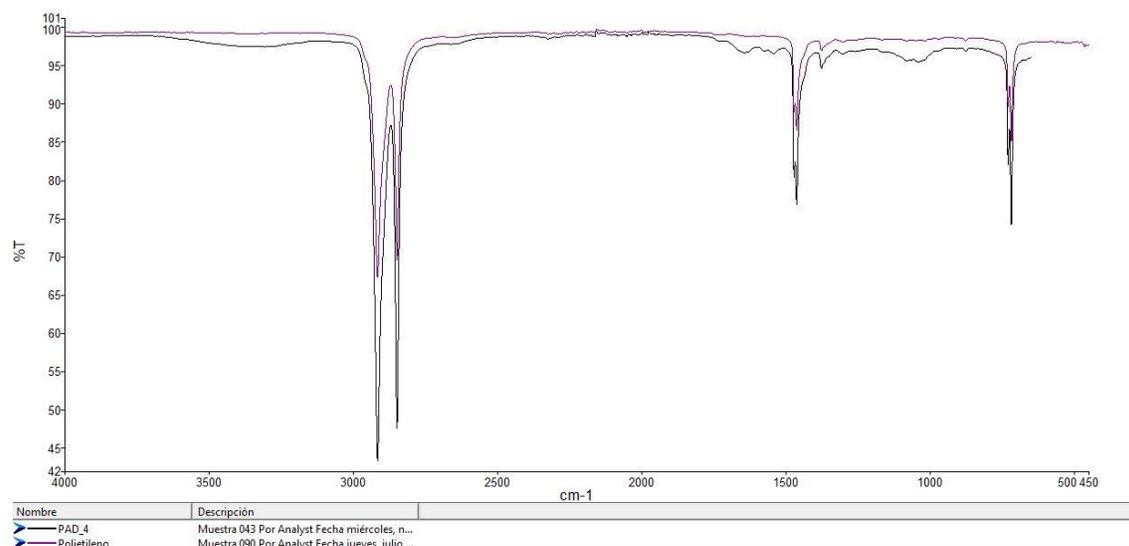


Figura 5.34. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al cuarto mes de observación del control de PEAD (elaboración propia, 2022)

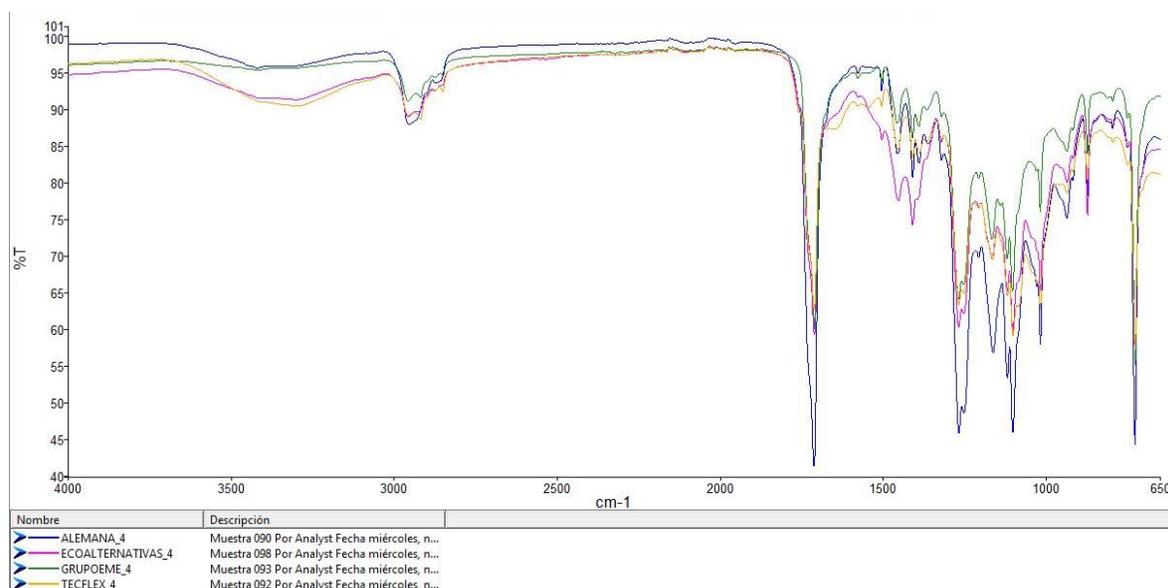


Figura 5.35. Espectros correspondientes al cuarto mes de observación de las bolsas etiquetadas como compostables Ecoalternativas, Wentus, Grupo EME y Tecflex (elaboración propia, 2022)

Por último, en cuanto a la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado de la misma forma que en los meses anteriores, no se ha notado un cambio significativo en su espectro, salvo la pequeña distorsión que, probablemente, se debe a la presencia de humedad remanente en la bolsa (Figura 5.36), pero a grandes rasgos el espectro ha conservado su forma original, porcentajes de transmitancia y picos principales.

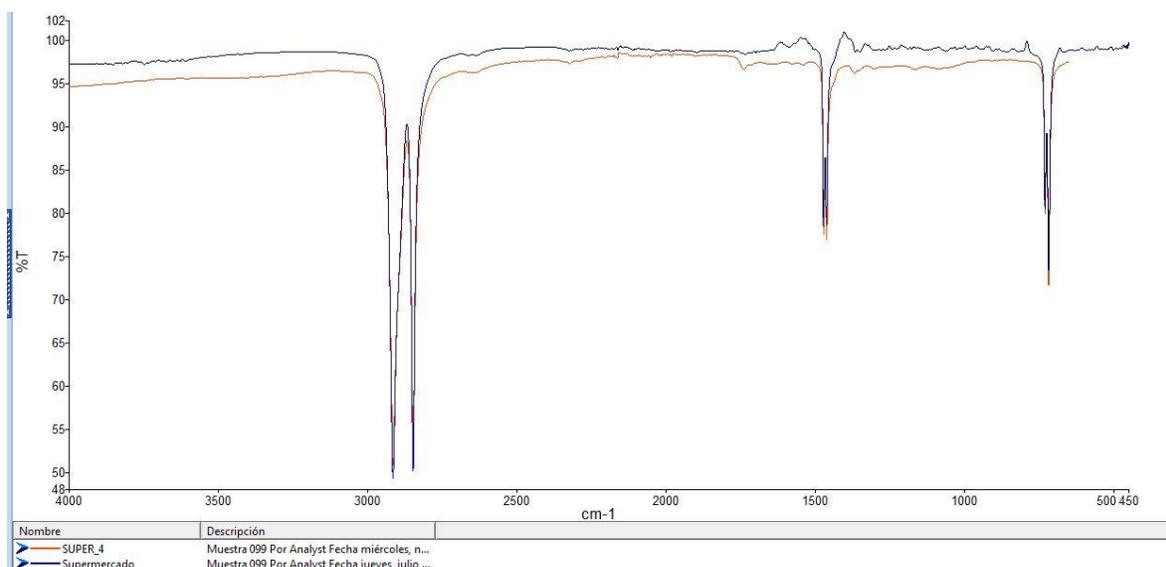


Figura 5.36. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al cuarto mes de observación de la bolsa del Supermercado (elaboración propia, 2022)

5.5.2. Características macro y microscópicas

En esta ocasión no se logró obtener nada de lixiviado de ningún lisímetro, por lo que se tomó la decisión de elegir el lisímetro 2 como el correspondiente al cuarto mes de observación, y es por ello que los códigos que aparecen en las fotografías tienen la terminación 02, sin embargo, las muestras de bolsas sí fueron rescatadas en el cuarto mes de observación.

En contraste al periodo anterior, la mayoría de las bolsas etiquetadas como compostables (Ecoalternativas, Wentus, Grupo EME y Tecflex) presentaron un desgaste significativo en cuanto a su integridad física, aun cuando la cantidad de lixiviado al interior del lisímetro fue nula, en los siguientes párrafos se hará la descripción más detallada. Por otro lado, la bolsa control 1 de PEAD y la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado no presentaron cambios significativos. Por último, la bolsa control de papel estaba casi destruida en su totalidad, había muy pocos pedacitos de ella dentro del lisímetro.

La bolsa control de PEAD no presentó cambios significativos ni desgaste en general, simplemente algunos manchones marrones que a pesar del lavado no se quitaron y los dobleces normales de haber estado amarrada cuatro meses (Figura 5.37a). En cuanto a la bolsa control de papel ya no se encontró casi nada de ella, salvo algunos pedazos muy pequeños pero que no lograrían llegar ni al 10% de su peso original (Figura 5.37b).

De la bolsa de Ecoalternativas se logró rescatar casi la mitad, misma que se encontraba bastante desgastada, presentaba roturas y desgarraduras evidencia clara de que la bolsa ha sufrido degradación, además se observó un cambio completo en cuanto a la coloración, que se ha alterado

a un marrón claro (Figura 5.37c). Por otro lado, la bolsa de Grupo Eme presentó una pérdida de material evidente pero no tan impresionante como la anterior, de hecho, la mitad de la bolsa rescatada conserva su coloración original y la otra mitad presentó un color marrón más oscuro con bastantes orificios y rasgaduras, evidencia de su degradación (Figura 5.37d).

La bolsa Wentus también presentó pérdida de material, agujeros, rasgaduras y cambio de color de verde a marrón oscuro (Figura 5.37e). En cuanto a la bolsa de Tecflex, ésta se ha roto en dos pedazos mayores, pero ambos presentan orificios, desgaste y rasgaduras bastante pronunciados, además del cambio de color de un amarillento translúcido a un marrón claro (Figura 5.37f).

Por último, la bolsa del supermercado se tuvo que abrir por otro lado para poder limpiarla ya que estaba muy bien amarrada, es en esta parte del nudo donde se observó un cambio ligero de color, pero en general está intacta, inclusive conserva la leyenda que se refiere a la euro norma (Figura 5.37g).



a. Control 1, PEAD



b. Control 2, Papel



c. Ecoalternativas



d. Grupo Eme

Figura 5.37. Características macroscópicas de las bolsas después de cuatro meses de observación (elaboración propia, 2022)



e. Wentus



f. Tecflex



g. Supermercado

Figura 5.37. Características macroscópicas de las bolsas después de cuatro meses de observación (continuación) (elaboración propia, 2022)

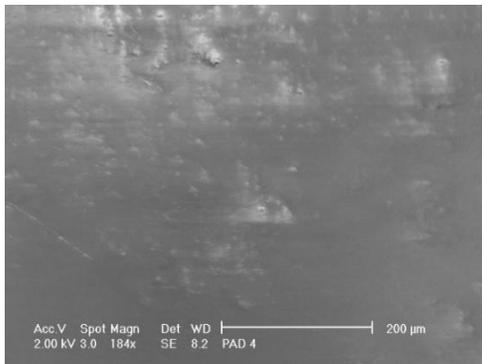
En cuanto al análisis de las características microscópicas de las bolsas evaluadas, en la Figura 5.38 se presentan las fotografías generadas mediante el microscopio electrónico de barrido de la DIMEI, el día 17 de noviembre de 2022.

Comparándolas con las fotografías obtenidas en el análisis preliminar y el primer mes de observación se puede resumir lo siguiente, la bolsa control de PEAD no ha tenido grandes cambios, sigue manteniendo una superficie bastante suave, con apenas algunas zonas con mayor elevación que bien pudieran ser algunos restos de residuos, sin embargo, no se observaron rasgaduras, orificios o desgaste alguno (Figura 5.38a).

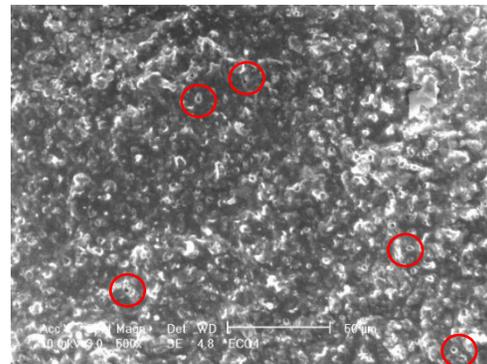
En contraste, la bolsa de Ecoalternativas muestra varias zonas carentes de iluminación, lo cual se traduce a espacios donde quedan atrapados los electrones, es decir, orificios bastante marcados (Figura 5.38b) que muestran evidencia de degradación a nivel microscópico. Por su parte, en la muestra de Tecflex se observan dos zonas más oscuras (Figura 5.38c), las cuales representan un desnivel bastante marcado en comparación a la zona con mayor iluminación y lo que se puede traducir en un desgaste sobre la superficie de la muestra.

En cuanto a la bolsa Wentus, la mayor parte de la muestra permaneció bastante similar a las anteriores, salvo ciertas zonas lenticulares en donde se mantiene la ausencia de iluminación y que

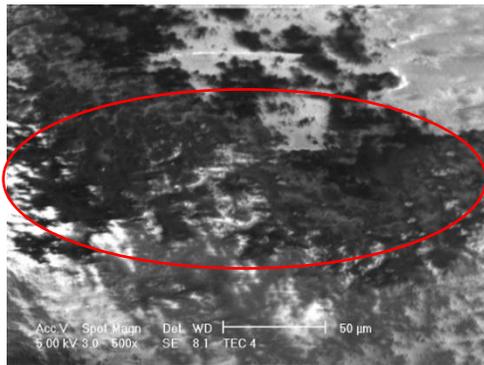
se pueden traducir como rasgaduras del material (Figura 5.38d). Por otro lado, la bolsa de Grupo Eme presentó una morfología bastante diferente a los análisis anteriores, su morfología lenticular se ha distorsionado en la mayoría de la superficie de la muestra, además, se pudo observar una zona más desnivelada en la Figura 5.38e que se puede traducir a un nivel más de desgaste. Por último se evaluó la muestra del Supermercado (Figura 5.38f), misma que no ha tenido cambios significativos en su morfología, en este análisis se evaluó a 250x porque se tuvieron bastantes problemas para enfocar al aumento de 500x, sin embargo, en general mantiene su textura suave sin alteraciones ni desgaste.



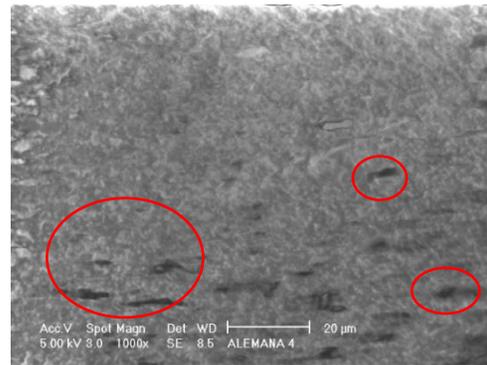
a. PEAD



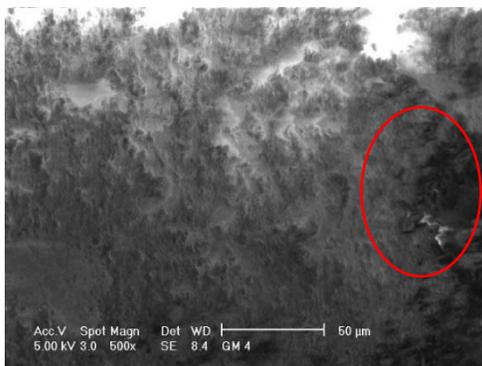
b. Ecoalternativas



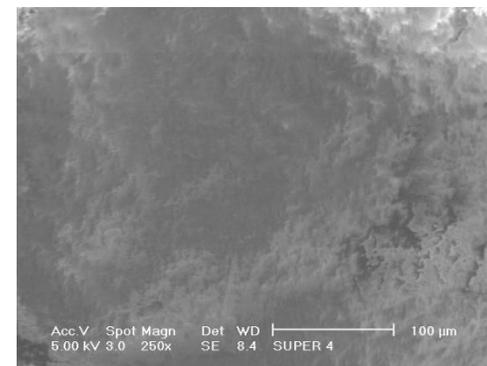
c. Tecflex



d. wentus



e. Grupo EME



f. Supermercado

Figura 5.38. Evidencia microscópica de las bolsas después de cuatro meses de observación (elaboración propia, 2022)

5.5.3. Rendimiento másico

El día 16 de noviembre se procedió a la obtención de las masas correspondientes a cada una de las bolsas recuperadas y que forman parte del cuarto mes de observación, los resultados se detallan en la Tabla 5.14. Cabe destacar que al no haber podido recolectar el control de papel no se menciona su peso.

Tabla 5.14. Registro de las masas obtenidas de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de cuatro meses de observación, (elaboración propia, 2022)

<i>Clave</i>	<i>Masa inicial (g)</i>	<i>Masa mes 4 (g)</i>
<i>PEAD_4</i>	79.90	79.13
<i>Eco_4</i>	10.55	4.43
<i>GE_4</i>	10.42	8.91
<i>Tec_4</i>	4.12	3.53
<i>Alem_4</i>	9.9	8.46
<i>Super_4</i>	2.03	1.99

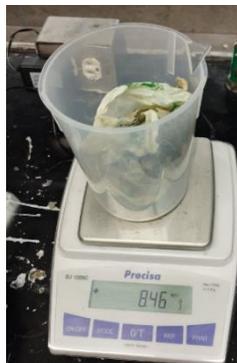
A continuación, en la Figura 5.39 se muestra el proceso de pesaje.



a. Control 3, PEAD



b. Ecoalternativas

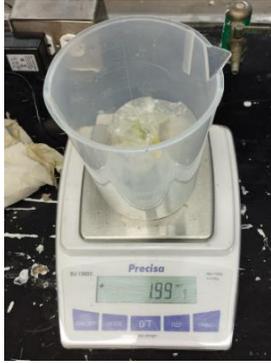


c. Wentus

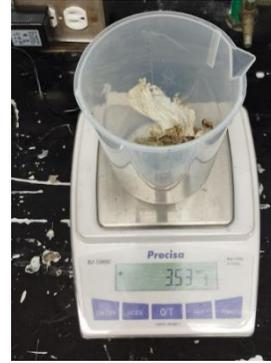


d. Grupo Eme

Figura 5.39. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de cuatro meses de observación (elaboración propia, 2022)



e. Supermercado



f. Tecflex

Figura 5.39. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de cuatro meses de observación (continuación) (elaboración propia, 2022)

5.5.4. Resultados de los análisis a los lixiviados

En la Figura 5.40 se presenta evidencia de lo seco que estaba este lisímetro, producto de la alta tasa de evapotranspiración que se genera en el sitio de estudio y que, aunada a la falta de precipitaciones en estas fechas limita la posibilidad de obtener lixiviado para su análisis. Por lo tanto fue imposible hacer las determinaciones estipuladas para este punto.



a. Última capa de residuos



b. Drenaje

Figura 5.40. Evidencia de la alta evapotranspiración que se generó en el lisímetro correspondiente al cuarto mes y prueba de que no existe lixiviado para realizar los análisis, (elaboración propia, 2022)

5.6. Resultados del mes 5 de observación

5.6.1. Análisis por Espectroscopía de IR

A continuación, en los siguientes párrafos se describen los datos obtenidos después de concluir el quinto mes de observación.

El espectro control de PEAD no ha presentado grandes cambios con respecto al análisis preliminar, ya que, como se ha mencionado en los meses anteriores, solamente es notoria una pequeña distorsión en el espectro, observable en una pequeña concavidad en los picos cercanos a 1,300 y 1,000 cm^{-1} que pueden traducirse como una pequeña presencia de humedad remanente, asimismo, es evidente que el espectro ha conservado su forma original y picos principales (Figura 5.41).

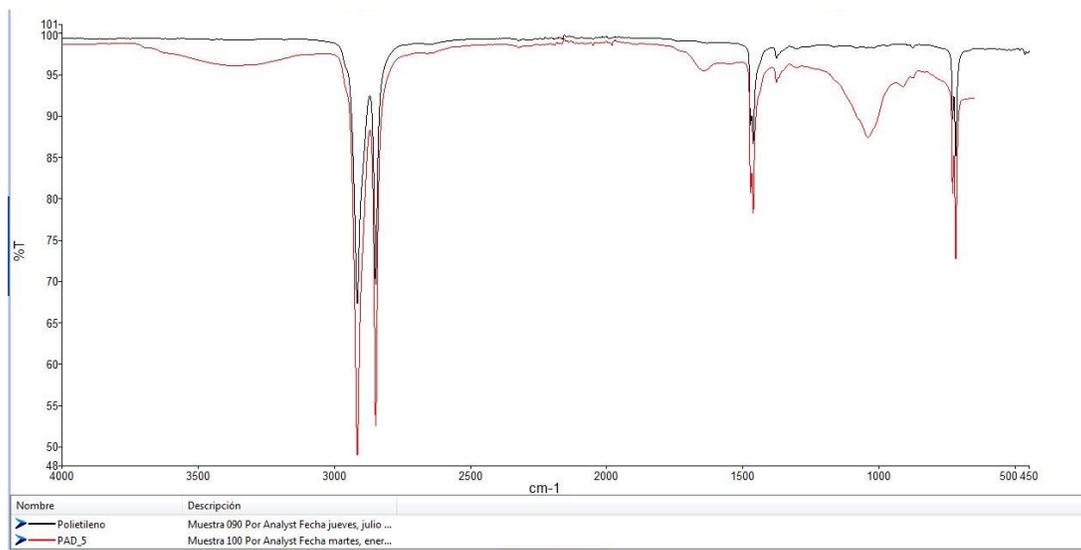


Figura 5.41. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al quinto mes de observación del control de PEAD (elaboración propia, 2022)

Las bolsas etiquetadas como compostables Ecoalternativas, Wentus y Tecflex, presentan un parecido bastante marcado en sus espectros, en su morfología, porcentajes de transmitancia (los cuales son bastante similares entre sí) y en la conservación de sus picos principales (Figura 5.42). Sin embargo, la bolsa comercializada por Grupo Eme vuelve a presentar ese pico correspondiente al enlace $-\text{CH}_2$ (transmitancia de 1,409 cm^{-1}), aunque en esta ocasión es bastante pequeña a comparación con las ocasiones anteriores, probablemente tenga que ver con las concentraciones y la calidad del material.

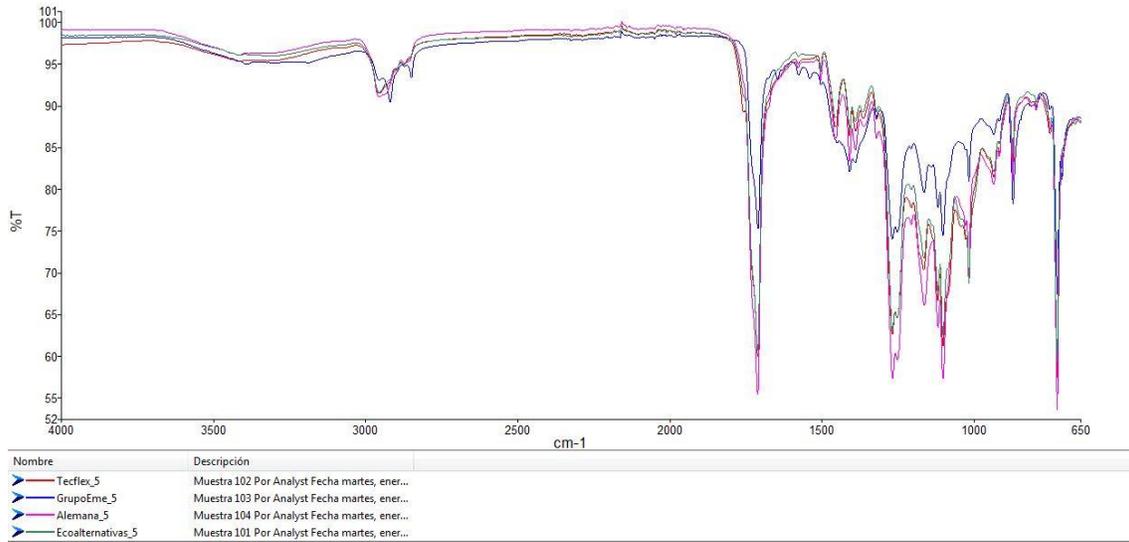


Figura 5.42. Espectros correspondientes al quinto mes de observación de las bolsas etiquetadas como compostables Ecoalternativas, Wentus, Grupo Eme y Tecflex (elaboración propia, 2022)

Por último, la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado ha seguido un patrón muy similar a los meses anteriores, ya que no se ha percibido un cambio significativo en su espectro, salvo una pequeña distorsión que, probablemente, se debe a la presencia de humedad remanente en la bolsa (Figura 5.43). Sin embargo, es notoria la conservación de su forma original, de sus porcentajes de transmitancia, así como la presencia de sus picos principales.

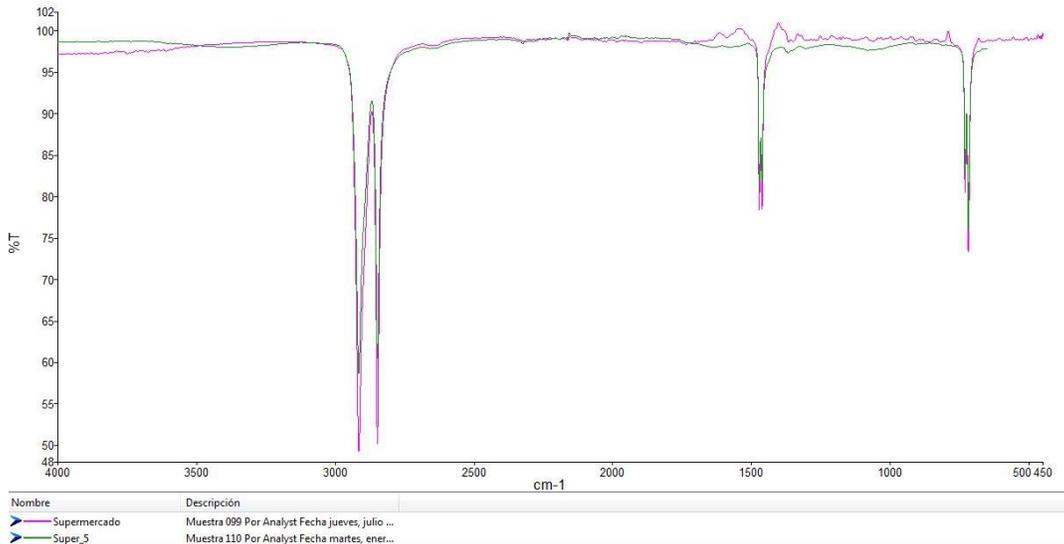


Figura 5.43. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al quinto mes de observación de la bolsa del Supermercado (elaboración propia, 2022)

5.6.2. Características macroscópicas

De manera similar al mes pasado, en esta ocasión tampoco se logró extraer lixiviado de ningún lisímetro, por lo que se tomó la decisión de elegir el lisímetro 4 como el correspondiente al quinto mes de observación, y es por ello por lo que los códigos que aparecen en las fotografías tienen la terminación 04, sin embargo, las muestras de bolsas sí fueron rescatadas al término del quinto mes de observación.

La mayoría de las bolsas etiquetadas como compostables (Ecoalternativas, Wentus, Grupo EME y Tecflex) presentaron un desgaste significativo en cuanto a su integridad física, aun cuando la cantidad de lixiviado al interior del lisímetro fue nula. Por otro lado, la bolsa control 1 de PEAD y la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado no presentan cambios significativos. Por último, sobre la bolsa control de papel ya no se encontraron rastros de ésta al interior del lisímetro.

La bolsa control de PEAD no presentó cambios significativos ni desgaste en general, simplemente algunos manchones marrones que a pesar del lavado no se quitaron y algunos dobleces y arrugas en su superficie, algo normal después de haber estado amarrada cinco meses (Figura 5.44a).

Sobre la bolsa de Ecoalternativas, se logró recolectar un poco menos de la mitad del material original, el cual ya presentaba un desgaste bastante considerable con roturas y orificios pronunciados, además el cambio de coloración es bastante notorio, pues se ha tornado de un marrón claro (Figura 5.44b). Por otro lado, la bolsa de Grupo Eme presentó una pérdida de material marcado por el desgarre casi total de la parte inferior de la bolsa y orificios a lo largo de toda su superficie, además más de la mitad de la bolsa presenta un cambio a un marrón bastante oscuro, muy diferente a su coloración original (Figura 5.44c).

Como se observa en la Figura 4.44d, la bolsa de Tecflex ha perdido una gran parte de su composición original, presenta múltiples orificios y desgarramientos en toda su superficie, el color sigue mostrándose casi igual al del mes anterior (marrón claro). Por su parte, la bolsa alemana Wentus también presenta una pérdida de material considerable, agujeros, rasgaduras y cambio de color de verde a marrón oscuro (Figura 5.44e). Por último, como en casi todos los meses anteriores, la bolsa del Supermercado tuvo que ser abierta por otro lado para poder limpiarla ya que estaba muy bien amarrada, es en esta parte del nudo donde se observó un cambio ligero de color, pero en general está intacta, inclusive conserva la leyenda que se refiere a la euro norma (Figura 5.44f).

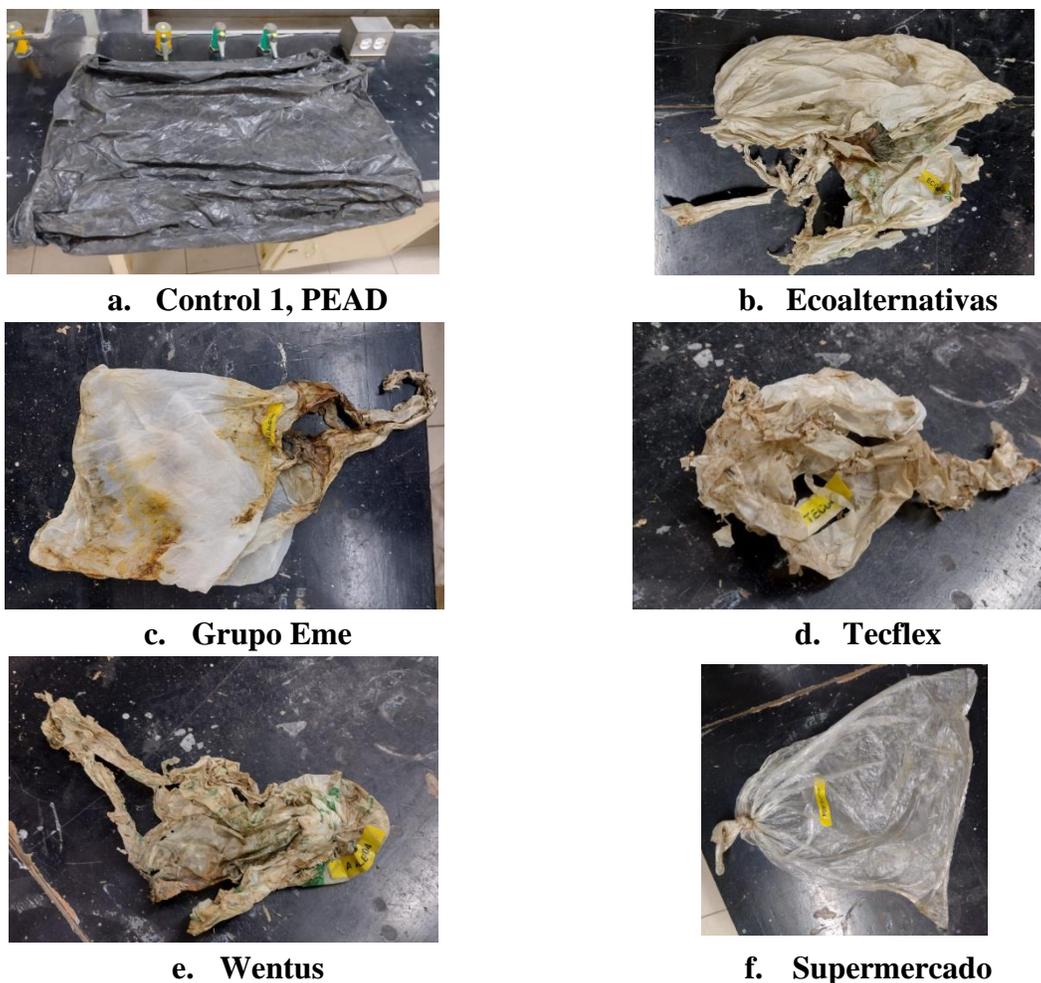


Figura 5.44. Características macroscópicas de las bolsas después de cinco meses de observación (elaboración propia, 2022)

5.6.3. Rendimiento másico

El día 5 de diciembre se procedió a la obtención de las masas de cada una de las bolsas correspondiente al mes 5 de observación, los resultados se detallan en la Tabla 5.15.

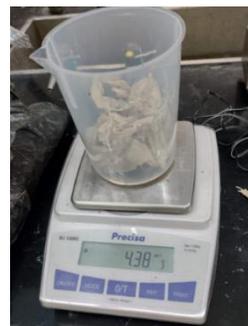
Tabla 5.15. Registro de las masas obtenidas de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de cinco meses de observación (elaboración propia, 2022)

<i>Clave</i>	<i>Masa inicial (g)</i>	<i>Masa mes 5 (g)</i>
<i>PEAD_5</i>	79.90	79.12
<i>Eco_5</i>	10.55	4.38
<i>GE_5</i>	9.57	5.78
<i>Tec_5</i>	4.12	3.21
<i>Alem_5</i>	9.9	6.68
<i>Super_5</i>	1.71	1.62

A continuación, en la Figura 5.45 se muestra el proceso de pesaje.



a. Control 3, PEAD



b. Ecoalternativas



c. Grupo Eme



d. Tecflex



e. Wentus



f. Supermercado

Figura 5.45. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de cinco meses de observación (elaboración propia, 2022)

5.6.4. Resultados de los análisis a los lixiviados

Desafortunadamente, al igual que el mes anterior, no fue posible recolectar ni una gota de lixiviado, por lo tanto, no fue posible realizar ninguno de los análisis pactados para esta parte, en la Figura 5.46 se presenta evidencia de lo seco que estaba ese lisímetro, producto de la alta tasa de evapotranspiración que se ha generado y que, aunada a la falta de precipitaciones en estas fechas limita la posibilidad de obtener el líquido necesario para realizar los estudios pertinentes.



a. Última capa de residuos



b. Drenaje

Figura 5.46. Evidencia de la alta evapotranspiración que se generó en el lisímetro correspondiente al quinto mes y prueba de que no existe lixiviado para realizar los análisis

5.7. Resultados del mes 6 de observación

5.7.1. Análisis por Espectroscopía de IR

A continuación, se explica a detalle lo observado durante el sexto y último mes de experimentación, así como los datos obtenidos.

Para el espectro del control de PEAD no se han encontrado grandes cambios con respecto al análisis preliminar, ya que, como se ha mencionado en los meses anteriores, solamente ha sido notoria una pequeña distorsión en la respuesta del espectro debida a la presencia de humedad remanente; de manera general, se conserva su morfología original, porcentajes de transmitancia y picos representativos (Figura 5.47). De la misma manera, la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado no ha presentado un cambio significativo en su espectro, salvo por la pequeña distorsión debida a la presencia de humedad remanente en la muestra, pero en su mayoría conserva tanto su forma original, porcentajes de transmitancia y picos principales. Por otro lado, tanto la bolsa control de PEAD y la del Supermercado, muestran un comportamiento muy similar entre ellas, aspecto que se ha venido monitoreando desde su análisis preliminar y que marcó un hallazgo importante en este trabajo pues, a pesar de que la bolsa del Supermercado cuenta con una etiqueta sobre materiales compostables, su espectro muestra que es todo lo contrario, dejando ver que su composición es más parecida a la del polietileno.

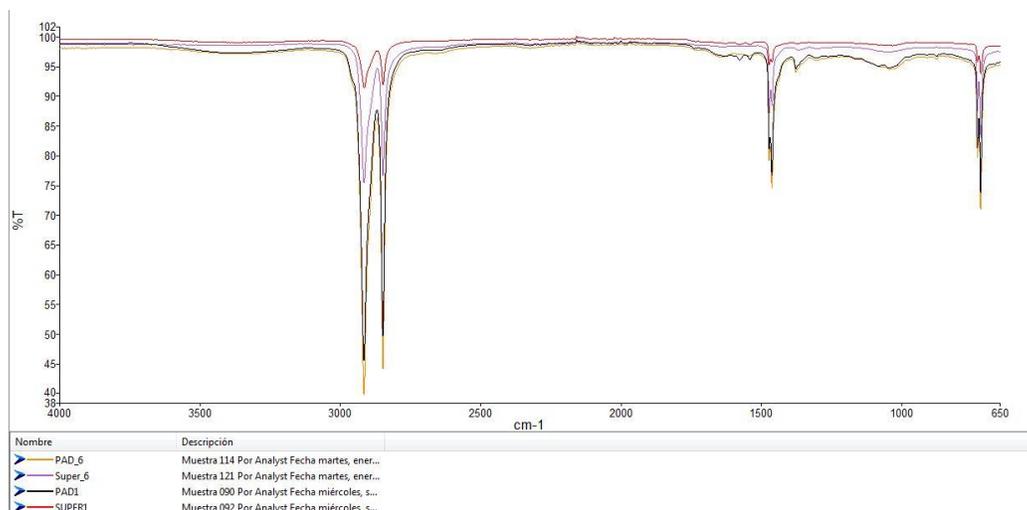


Figura 5.47. Comparación entre el espectro preliminar y el correspondiente al sexto mes de observación tanto del control 1 de PEAD como del Supermercado (elaboración propia, 2023)

De la misma forma que en el mes anterior, en las bolsas etiquetadas como compostables Ecoalternativas, Wentus y Tecflex, se ha conservado una similitud bastante marcada en sus espectros (Figura 5.48), se han conservado sus picos principales y la diferencia entre los porcentajes de transmitancia es casi imperceptible. Sobre la bolsa de PBAT que corresponde a la comercializada por Grupo Eme, se puede observar nuevamente la presencia del pico correspondiente a $1,409\text{ cm}^{-1}$, $-\text{CH}_2$, inclusive un poco más marcado que el mes anterior y que puede deberse a una cuestión de concentraciones y, que al mismo tiempo, puede ir de la mano con la calidad en la fabricación del material.

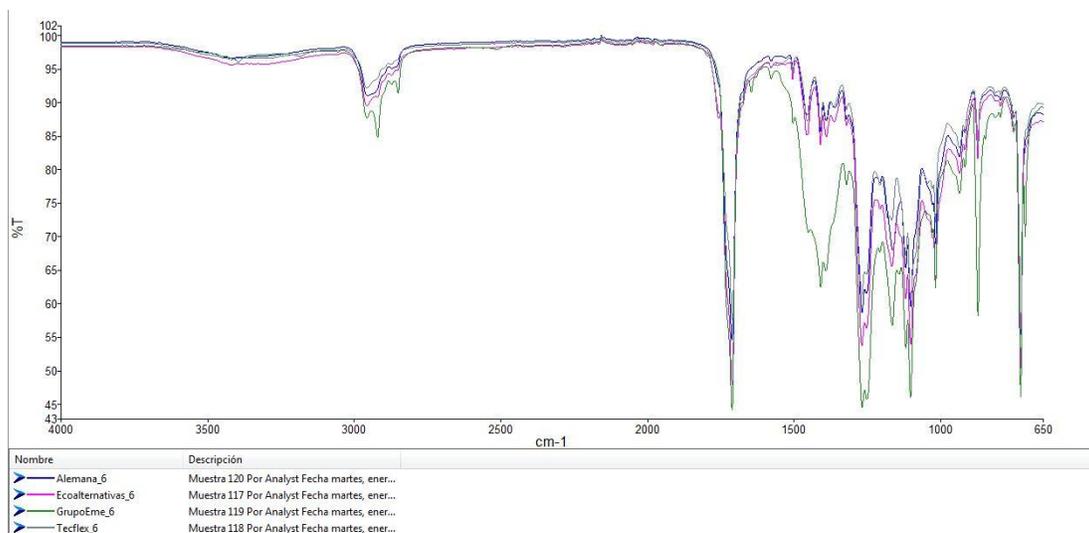


Figura 5.48. Espectros correspondientes al sexto mes de observación de las bolsas etiquetadas como compostables Ecoalternativas, Wentus, Grupo Eme y Tecflex (elaboración propia, 2023)

Por último, se presentan los espectros de cada bolsa durante el último mes de experimentación (Figura 5.49) y la comparación entre el primer y último mes de observación de todas las bolsas analizadas (Figura 5.50). Sobre el primer caso es bastante clara la diferencia entre las bolsas que sí son compostables y las que no lo son. La mayoría de ellas están fabricadas de fécula de maíz y PLA, por ello su comportamiento es bastante similar (colores magenta, gris y azul marino), la bolsa de PBAT que es la comercializada por Grupo Eme (color verde) tiene un comportamiento parecido a las demás bolsas compostables, salvo en la zona de $1,409\text{ cm}^{-1}$, que como se ha estado mencionando esto puede deberse a un tema de concentraciones que va de la mano con la calidad en el material pues no fue apreciable durante todos los meses.

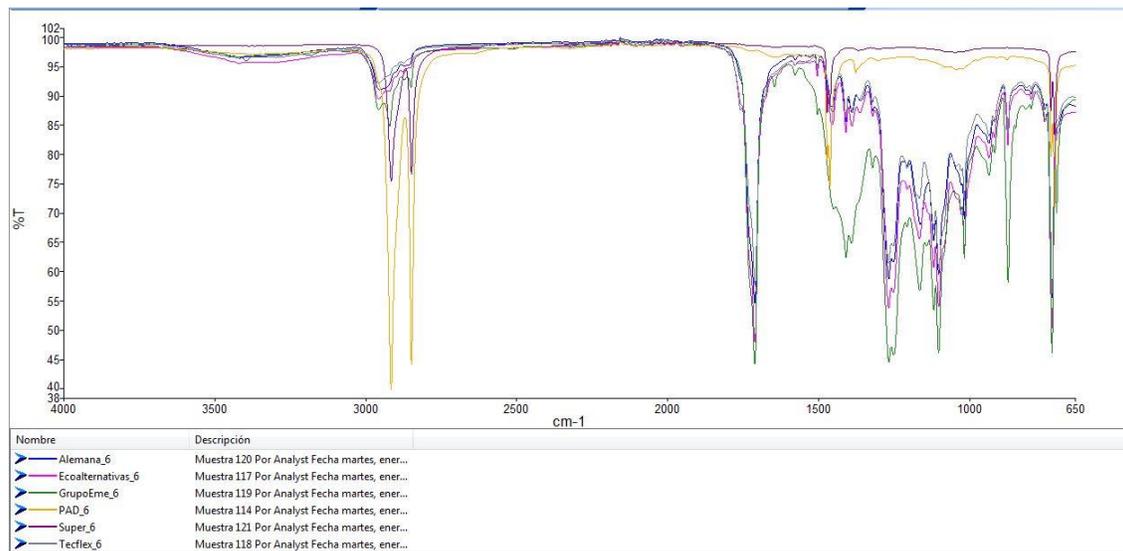


Figura 5.49. Espectros de todas las bolsas analizadas durante el sexto mes de observación (elaboración propia, 2023)

En cuanto a la Figura 5.50, se observa que todas las bolsas presentaron un comportamiento bastante similar entre sí, en términos generales, para las bolsas de Ecoalternativas, Wentus y Tecflex, presentaron un desplazamiento promedio en el porcentaje de transmitancia de su espectro de alrededor del 11% en comparación a su espectro preliminar, por su parte, la bolsa comercializada por Grupo Eme tuvo una variación promedio del 13% en su porcentaje de transmitancia preliminar. Por otro lado, las bolsas del Supermercado y el control de PEAD sufrieron una modificación del 37 y el 24% respectivamente, y esto se debe a que, a lo largo de los meses, ambas bolsas tuvieron una retención importante de agua dentro de su estructura, la cual queda constatada en la morfología curvada presente en las longitudes de onda de $1,500-1,000\text{ cm}^{-1}$.

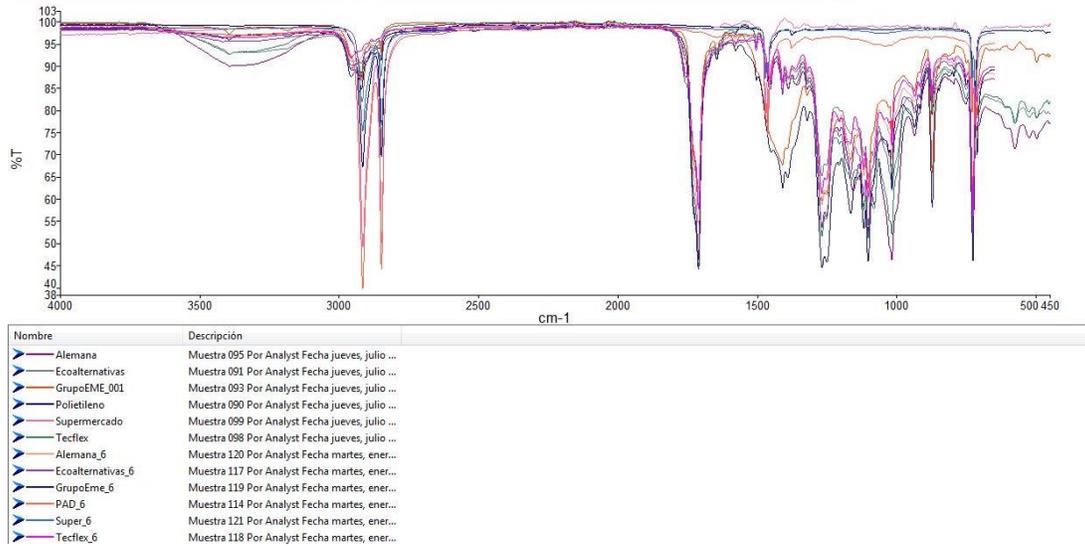


Figura 5.50. Comparación entre el análisis preliminar y el último mes de observación de los espectros de todas las bolsas analizadas (elaboración propia, 2023)

5.7.2. Características macro y microscópicas

Como nota aclaratoria, en algunas fotografías se observa la numeración 05, sin embargo, este lisímetro sí corresponde al sexto mes de observación simplemente, a lo largo de los meses, se cambiaron las numeraciones de los lisímetros debido a la necesidad de recolectar los lixiviados donde se pudiera aunque sí se cumplieron con los meses estipulados para todo el experimento.

Como era de esperarse y de acuerdo con el comportamiento que han venido presentando la mayoría de las bolsas etiquetadas como compostables (Ecoalternativas, Wentus, Grupo EME y Tecflex), se pudo observar un desgaste significativo en comparación a su composición original. Por otro lado, la bolsa control 1 de PEAD y la bolsa etiquetada como compostable del Supermercado no presentaron cambios significativos de manera macroscópica. Por último, de la bolsa control 2 de papel ya no quedaron rastros al interior del lisímetro.

Para el sexto mes de observación, la bolsa control 1 de PEAD no presentó cambios significativos ni desgaste en su superficie, solamente se lograron visualizar los dobleces normales que podría presentar una bolsa después de haber estado amarrada seis meses (Figura 5.51a).

La bolsa de Ecoalternativas, presenta un desgaste significativo con roturas y orificios pronunciados y pérdida de material bastante notorio, además del cambio de coloración original, tornándose en un marrón claro (Figura 5.51b). Por otro lado, la bolsa de Grupo Eme presentó una pérdida de material marcado por el desgarre casi total de la parte inferior de la bolsa así como orificios a lo largo de toda su superficie, además más de la mitad de la bolsa presenta un cambio de color a un marrón bastante oscuro (Figura 5.51c).

En la Figura 5.51d se observa la bolsa de Tecflex la cual ha perdido una gran parte de su composición original, presenta múltiples orificios y desgarramientos en toda su superficie, el color sigue mostrándose casi igual al del mes anterior (marrón claro). Por su parte, la bolsa alemana Wentus también presentó bastantes agujeros, rasgaduras y un cambio en su coloración original de verde a marrón oscuro (Figura 5.51e). Por último, la bolsa del Supermercado no muestra signos de desgaste, orificios ni roturas inclusive conserva la leyenda que se refiere a la euro norma (Figura 5.51f).



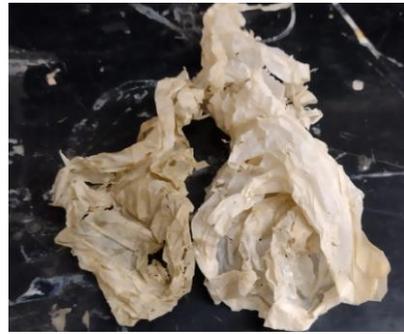
a. Control 1, PAD



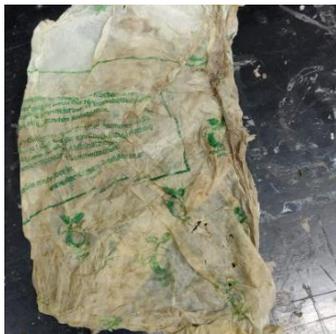
b. Ecoalternativas



c. Grupo Eme



d. Tecflex



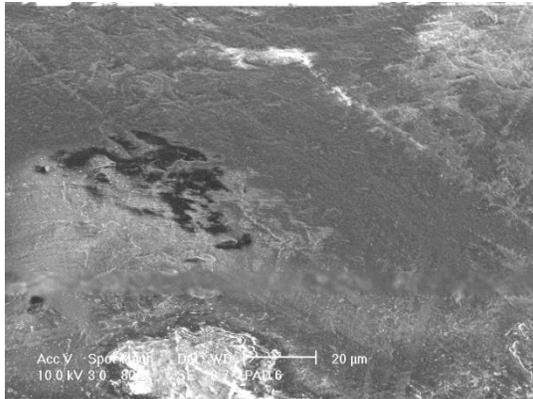
e. Wentus



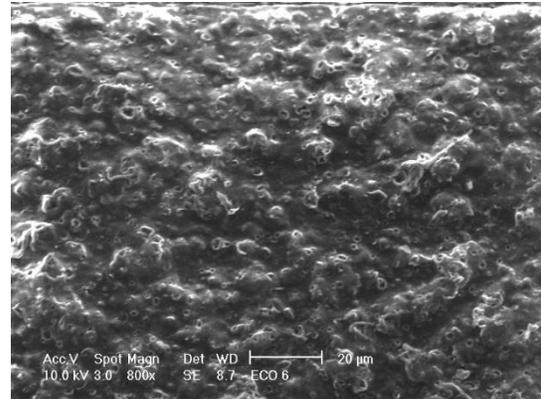
f. Supermercado

Figura 5.51. Características macroscópicas de las bolsas después de seis meses de observación (elaboración propia, 2023)

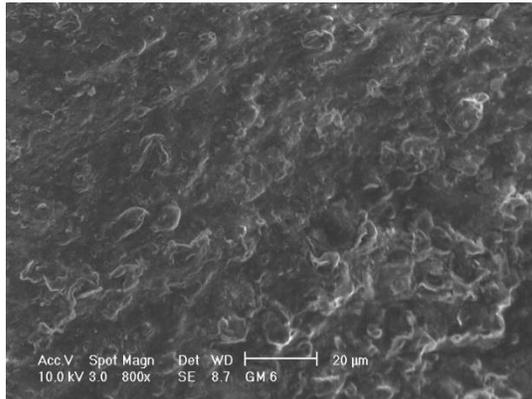
En cuanto al análisis de las características microscópicas de las bolsas evaluadas, en la Figura 5.52 se presentan las fotografías generadas mediante el microscopio electrónico de barrido de la DIMEI, el 16 de enero de 2023:



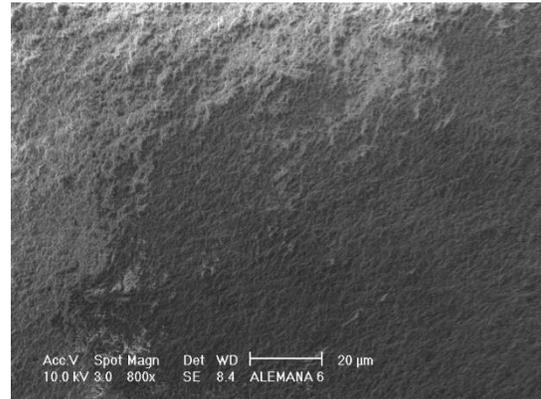
a. PEAD



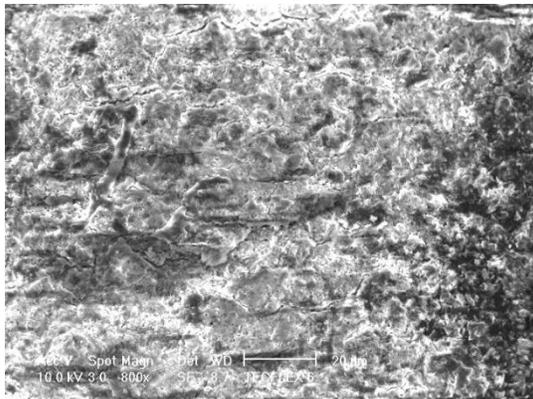
b. Ecoalternativas



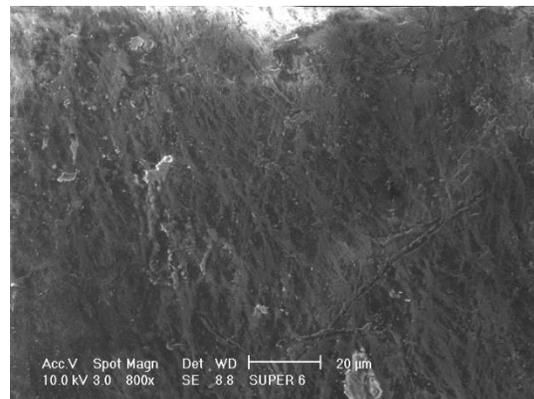
c. Grupo EME



d. Wentus



e. Tecflex



f. Supermercado

Figura 5.52. Evidencia microscópica de las bolsas evaluadas después de seis meses de observación (elaboración propia, 2023)

Todas las muestras fueron evaluadas con 500x, 800x y 1000x, sin embargo, las fotografías en el aumento 800x fueron las mejores en cuanto a nivel de brillo, saturación y enfoque. Comparándolas

con las fotografías obtenidas en el análisis preliminar y el sexto mes de observación se puede resumir lo siguiente:

La bolsa control de PEAD no ha tenido grandes cambios, ha mantenido una superficie bastante suave, con apenas algunas zonas con mayor elevación que bien pudieran ser algunos restos de residuos, sin embargo, no se observan ni rasgaduras, ni orificios por lo que se puede confirmar que el desgaste que ha sufrido esta bolsa en seis meses es prácticamente nulo (Figura 5.52a).

Por su parte, la bolsa de Ecoalternativas mostró varias zonas carentes de iluminación, lo que se traduce a espacios donde quedan atrapados los electrones, es decir, orificios bastante marcados (Figura 5.52b) muestra contundente de degradación a nivel microscópico. Por otro lado, la bolsa de Grupo Eme presentó una morfología bastante diferente a los análisis anteriores, su morfología actual mostró zonas con pérdida significativa de luz, evidencia clara de un desgaste significativo en su superficie, tal como se observa en la Figura 5.52c. En cuanto a la bolsa Wentus, la mayor parte de la muestra presentó una zona bastante oscura y con menor elevación que la parte iluminada, evidencia clara de que la bolsa ha sufrido un desgaste marcado en su superficie (Figura 5.52d). En la muestra analizada de la bolsa Tecflex se observó una zona muy oscura del lado derecho de la imagen (Figura 5.52e), que representan un desnivel marcado en comparación a la zona con mayor iluminación, esto demuestra evidencia del desgaste que ha sufrido la bolsa.

Por último se evaluó la muestra del supermercado (Figura 5.52f), comparándola con su análisis preliminar se puede decir que su morfología reticular es muy parecida, salvo por algunas marcas que en la fotografía que representa el sexto mes, son más profundas y pronunciadas y que pueden ser evidencia de algún tipo de desgaste microscópico.

5.7.3. Rendimiento másico

El día 8 de enero del 2023 se obtuvieron las masas de cada una de las bolsas correspondientes al sexto y último mes de observación, los resultados se detallan en la Tabla 5.16.

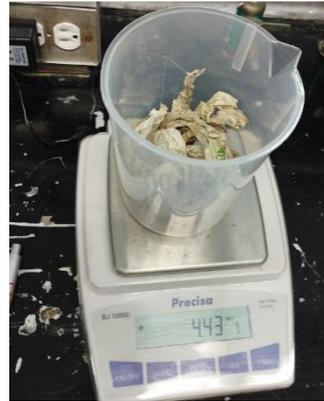
Tabla 5.16. Registro de las masas obtenidas de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables al sexto mes de observación (elaboración propia, 2023)

<i>Clave</i>	<i>Masa inicial (g)</i>	<i>Masa mes 6 (g)</i>
<i>PEAD_6</i>	79.90	79.11
<i>Eco_6</i>	10.55	4.30
<i>GE_6</i>	9.24	6.23
<i>Tec_6</i>	4.12	3.12
<i>Alem_6</i>	9.9	6.10
<i>Super_6</i>	1.78	1.69

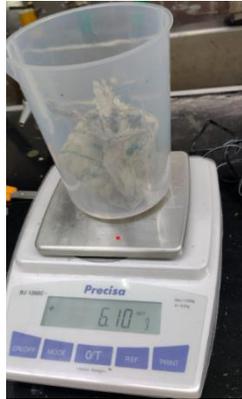
A continuación, en la Figura 5.53 se muestra el proceso de pesaje.



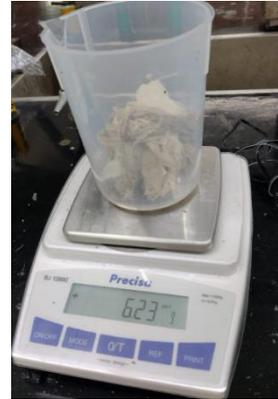
a. Control 3, PEAD



b. Ecoalternativas



c. Wentus



d. Grupo Eme



e. Supermercado



f. Tecflex

Figura 5.53. Proceso de pesaje de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables después de seis meses de observación (elaboración propia, 2023)

La Figura 5.54 es una gráfica donde se representa el cambio en el peso original de todas las bolsas evaluadas, evidencia de su nivel de desgaste y, por ende, la degradación que se ha generado en cada una de ellas, siendo la bolsa de Ecoalternativas la que presenta la mayor pérdida de su material original, con alrededor del 59% de su peso perdido al sexto mes de observación, le sigue la bolsa

alemana Wentus, que ha perdido alrededor del 38% de su material original; en tercer lugar está la bolsa comercializada por Grupo Eme, la cual perdió alrededor del 33% de su material al término del experimento, por su parte la bolsa Tecflex perdió cerca del 31% de su composición original, la bolsa del supermercado tiene una pérdida de aproximadamente el 5% de su material y la bolsa control del PAD no perdió ni el 1% de su peso original.

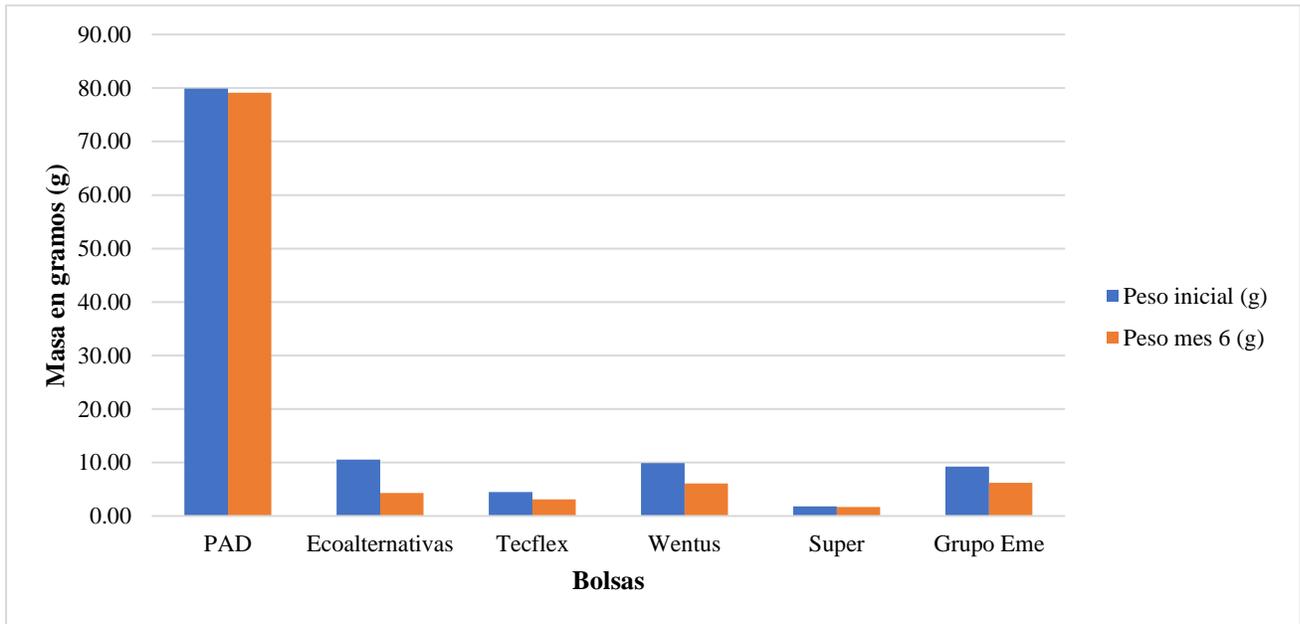


Figura 5.54. Rendimiento másico de las bolsas analizadas durante el primer y el último mes de observación (elaboración propia, 2023)

5.7.4. Propiedades mecánicas

El día 1° de febrero del 2023 se realizaron las pruebas mecánicas a las muestras recuperadas después al sexto mes de experimentación, con ayuda del M.C. Eliezer Hernández Mecinas y el Dr. Antonio Sánchez Solís del Instituto de Investigaciones en Materiales. Cabe destacar que, debido al daño que presentaban las bolsas fue difícil obtener más de una probeta de cada bolsa, por lo que solamente se analizó una probeta de cada una, es decir, seis en total. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.17.

Por otro lado, en la Tabla 5.18 se resumen los datos obtenidos durante el ensayo preliminar y una vez concluidos los seis meses de experimentación, en ella se detalla también qué tanto cambiaron los datos de esfuerzo y deformación. Se puede observar que las bolsas que sí han demostrado ser compostables (Ecoalternativas, Tecflex, Wentus y Grupo Eme), tuvieron una disminución en el esfuerzo necesario para ser deformadas, de entre el 59 y 80%, asimismo, la deformación para el sexto mes disminuyó entre un 63 y 87% esto debido al desgaste producido en los materiales. Por su parte, las bolsas del Supermercado y el control de PAD no sufrieron disminución importante en

el esfuerzo necesario para ser deformadas (0.6 y 1%, respectivamente), de igual manera, su deformación para el sexto mes se redujo entre el 16 y el 0.5% solamente.

Tabla 5.17. Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas finales realizadas a las bolsas de plástico analizadas (elaboración propia, 2023)

<i>Clave</i>	<i>Módulo elástico, MPa</i>	<i>Máx. esfuerzo, MPa</i>	<i>Máx. desplazamiento, mm</i>	<i>Rotura de esfuerzo, MPa</i>	<i>Rotura de deformación, %</i>	<i>Máx. fuerza, N</i>	<i>Energía, J</i>
PEAD_6	297.833	20.896	52.836	39.745	49.741	28.4245	5.475
Eco_6	92.269	4.075	9.253	2.806	9.67	1.5893	0.008
GE_6	150.129	2.398	2.42	1.646	3.42	0.9351	0.001
Tec_6	114.928	4.008	8.087	2.709	8.67	3.0062	0.009
Wentus_6	94.43	4.247	9.963	3.132	10.881	3.411	0.187
Super_6	1075.214	52.604	57.669	33.945	69.169	9.4688	0.578

Tabla 5.18. Esfuerzo-deformación durante el primer y sexto mes de observación, (elaboración propia, 2023)

<i>Bolsas</i>	<i>Preliminar</i>		<i>Mes 6</i>		<i>Diferencia esfuerzo, %</i>	<i>Diferencia deformación, %</i>
	<i>Máx. esfuerzo, MPa</i>	<i>Rotura de deformación, %</i>	<i>Máx. esfuerzo, MPa</i>	<i>Rotura de deformación, %</i>		
PEAD	22.079	59.491	20.896	49.741	5.3580	16.3890
Ecoalternativas	9.848	26.086	4.075	9.67	58.6210	62.9303
Tecflex	16.011	25.048	4.008	8.67	74.9672	65.3865
Wentus	21.021	29.037	4.247	10.881	79.7964	62.5271
Grupo Eme	5.935	27.295	2.398	3.42	59.5956	87.4702
Supermercado	52.896	69.541	52.604	69.169	0.5520	0.5349

En la Figura 5.55 se observa la gráfica de esfuerzo (MPa) contra deformación (%) para el sexto mes de observación, en ella se nota la gran diferencia que existe entre las bolsas que sí han demostrado ser compostables (Ecoalternativas, Tecflex, Wentus y Grupo Eme) y las que han demostrado ser de polietileno (Supermercado y Control 1, PEAD). Debido al desgaste sufrido después de seis meses de estar enterradas, las bolsas compostables necesitaron un esfuerzo mucho menor (<5 MPa) para ser deformadas, en comparación a las pruebas preliminares. Por otro lado, las bolsas de polietileno no tuvieron grandes variaciones en comparación a los resultados obtenidos en sus pruebas preliminares. En la Figura 5.56 se presenta una gráfica en la que se puede comparar la respuesta de cada una de las bolsas ante el ensayo de tracción tanto al inicio como al final de la experimentación, en ella, se observa claramente el decremento de su esfuerzo-deformación.

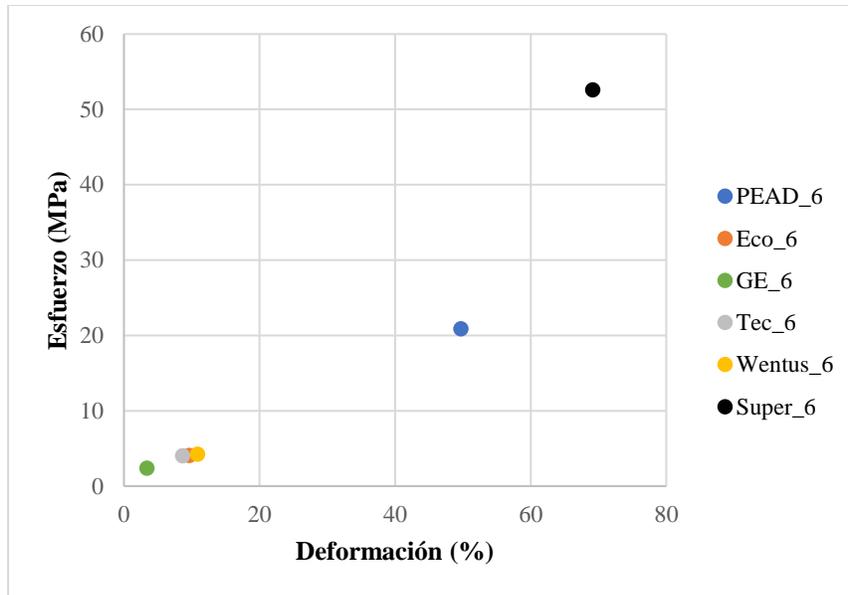


Figura 5.55. Ensayo de tracción final de todas las bolsas analizadas (elaboración propia, 2023)

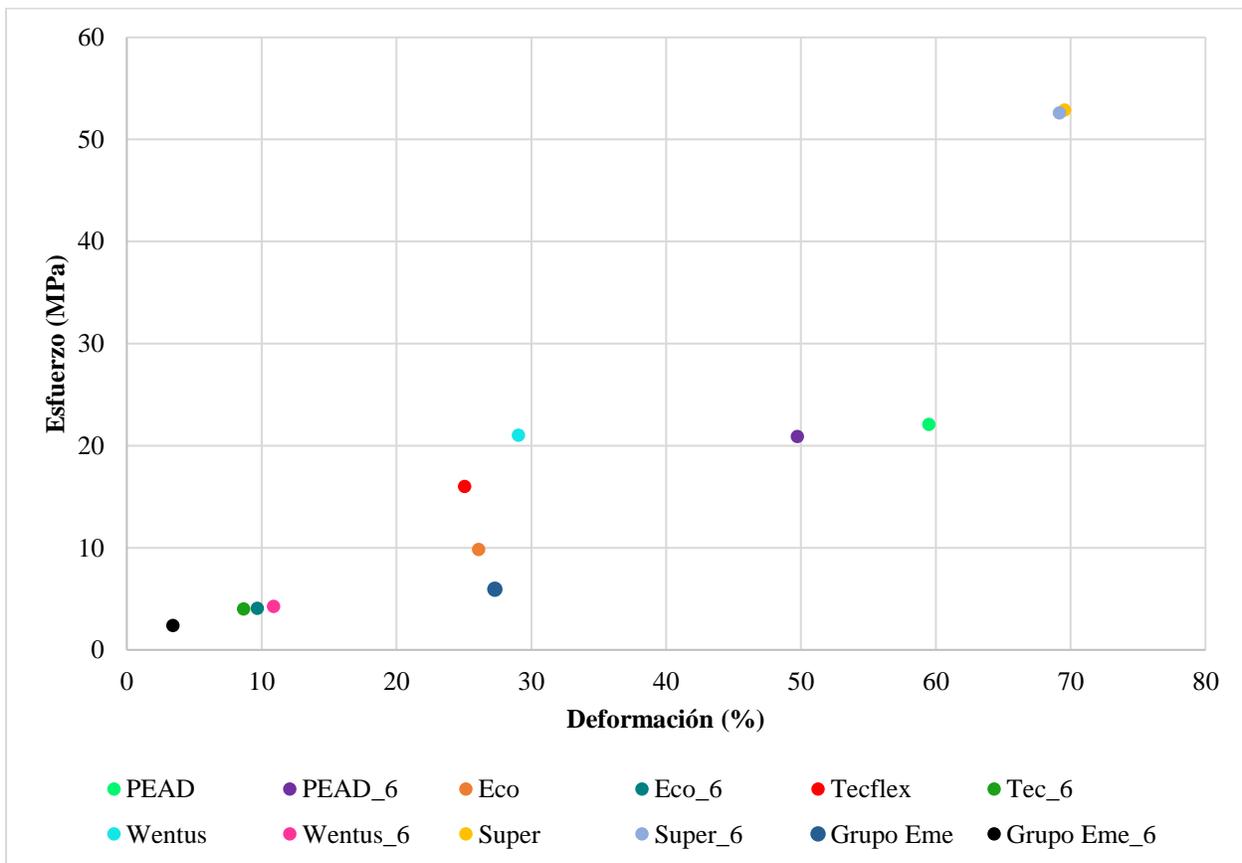


Figura 5.56. Comparación entre el ensayo de tracción inicial y final de todas las bolsas analizadas (elaboración propia, 2023)

Por último, en la Figura 5.57 se muestra evidencia del ensayo de tracción final realizado a las muestras plásticas.



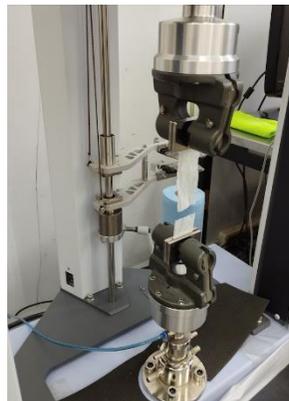
a. Control 1, PEAD



b. Ecoalternativas



c. Wentus



d. Grupo Eme



e. Tecflex



f. Supermercado

Figura 5.57. Evidencia del ensayo de tracción final (elaboración propia, 2023)

5.7.5. Resultados de los análisis a los lixiviados

En la Figura 5.58 se presenta evidencia de lo seco que estaba este lisímetro, producto de la alta tasa de evapotranspiración que se genera en el sitio donde se encuentra montado el experimento y

que, aunada a la falta de precipitaciones en estas fechas limita la posibilidad de obtener lixiviado para su análisis. Por lo tanto fue imposible hacer las determinaciones estipuladas para este punto.



c. Capa impermeable



d. Drenaje

Figura 5.58. Evidencia de la alta evapotranspiración que se generó en el sexto y último lisímetros razón por la cual no se pudo recolectar lixiviado (elaboración propia, 2023)

6. DISCUSIÓN

Si bien la degradación de los plásticos dentro de una composta está bastante estudiada y documentada dentro de la literatura, en donde se discuten los distintos procesos que se pueden llegar a experimentar, así como los distintos parámetros a considerar (por ejemplo, la composición del material plástico, la acción de los microorganismos, la temperatura, la humedad, el nivel de oxígeno, el pH, etc.); es de mucha utilidad el conocer o, al menos, tener una idea de lo que podría suceder en un escenario como el que se desarrolló en el modelo experimental, esto debido a que desgraciadamente, se sabe que la mayoría de los residuos orgánicos embolsados en las bolsas de plástico etiquetadas como compostables no van a terminar en una composta, es posible que su disposición final sea un relleno sanitario, de ahí la importancia que tiene el identificar el comportamiento de este tipo de materiales bajo esas condiciones.

Una vez analizados todos los resultados obtenidos se puede aseverar que tanto la bolsa control 1 de polietileno de alta densidad (PEAD) como la obtenida del Supermercado de la CDMX tuvieron un muy bajo nivel de degradación, esto está confirmado en la respuesta de su espectro (la cual también confirmó que se trataba de materiales altamente similares entre sí), en la pérdida de masa (que en el caso del PEAD fue menor al 1% y en el caso de la bolsa del Supermercado fue de alrededor del 5%), en el cambio en sus propiedades mecánicas (que no tuvieron una variación significativa en su deformación más allá del 16% en el caso del PEAD y del 0.5% en el caso de la bolsa del Supermercado) y en sus características macro y microscópicas, las cuales a grandes rasgos, solamente mostraron una pérdida en el brillo del material pero que no presentaron ni una sola muestra de orificios, desgarramientos o fracturas. Aún con estos resultados, existen algunos trabajos que señalan haber encontrado degradación en este tipo de plásticos dentro de rellenos sanitarios y que ésta se encuentra relacionada con el nivel de oxígeno en el medio, el cual varía con la profundidad (Muenmee et. al, 2016). Además, se habla mucho sobre cómo tratar los materiales plásticos mediante ataques bacterianos, fúngicos y/o enzimáticos con la finalidad de vulnerar la estructura del polietileno, por ejemplo, y producir erosiones en el plástico, sin embargo, esto requiere de tiempo para obtener resultados y, además, una inversión alterna de recursos (Ccallo-Arelas et al., 2020; Guerrero-Cabrera et al., 2022).

Por otro lado, los resultados obtenidos de las bolsas fabricadas con fécula de maíz muestran una grata sorpresa, ya que los niveles de degradación que se generaron en estos materiales plásticos fueron bastante impresionantes. En este caso, las bolsas evaluadas fueron Ecoalternativas, Wentus y Tecflex, las cuales mostraron una disminución en el porcentaje de transmitancia inicial de un 11%. En cuanto a la pérdida de su masa inicial ésta tuvo una variación de entre el 31 y 59%. Además, sobre el cambio en sus propiedades mecánicas quedó demostrado que sufrieron una deformación mayor (de entre el 62 y 65% más que al inicio) con un esfuerzo muchísimo menor (entre 59 y 80% menos que en la prueba preliminar), por último, es evidente el cambio en sus

características macro y microscópicas, pues la mayoría de los materiales sufrieron distintos desgastes en forma de orificios, desgarraduras, fracturas y en el cambio de su coloración.

Sobre la bolsa de plástico fabricada con PBAT, es decir, la bolsa comercializada por Grupo Eme, también se observaron niveles de degradación sumamente interesantes, por ejemplo, la disminución en el porcentaje de transmitancia inicial de un 13% y una pérdida en su masa inicial de alrededor del 33%. Además, se observó un cambio en sus propiedades mecánicas evidenciado en una deformación mayor (de 87% más que al inicio) con un esfuerzo muchísimo menor (60% menos que en la prueba preliminar), por último, es evidente el cambio en sus características macro y microscópicas, ya que la película plástica sufrió un desgaste significativo en la mayor parte de su superficie en forma de orificios, desgarraduras, fracturas y cambio en su coloración.

Si bien, dentro de la literatura existen artículos sobre plásticos compostables y su degradación bajo condiciones de rellenos sanitarios, las metodologías difieren a la presentada en este trabajo, por ejemplo, los materiales plásticos fueron cortados o emplazados sobre un marco (Quecholac-Piña et al., 2021; Adamcová et al., 2016) y colocados dentro de una simulación o dentro de un relleno real, mientras que en este estudio se decidió rellenar las bolsas para observar un comportamiento más parecido a la realidad de lo que se espera, llegará a un relleno sanitario. A pesar de ello, se logró identificar similitudes en los siguientes aspectos:

- En cuanto a la pérdida de las propiedades mecánicas de los materiales plásticos, en especial del PBAT.
- La pequeña diferencia en las propiedades mecánicas reportadas para las bolsas de PEAD.
- La presencia de los grupos funcionales y la similitud en los espectros obtenidos para los plásticos de PBAT y PEAD.
- El deterioro de los materiales plásticos a nivel macro y microscópico (tanto PBAT como fécula de maíz).
- El casi imperceptible cambio en los materiales plásticos de PEAD a escala macro y microscópica.

Es importante recalcar que, aunque se trató de semejar lo más posible a las condiciones que se podrían encontrar en un relleno sanitario, los niveles de degradación que se lleguen a presentar en un escenario real pueden llegar a ser diferentes. Los lisímetros fueron rellenos con el volumen necesario de acuerdo a su capacidad, la compactación fue realizada con el fin de evitar que sufrieran algún tipo de daño, se eligieron cuidadosamente los residuos orgánicos embolsados para evitar la rasgadura de los materiales plásticos y, por último, los lisímetros eran revisados con periodicidad para verificar que estuviera llevándose a cabo todo de forma correcta. Si bien, en este experimento se comenzaron a notar signos de degradación para los materiales de fécula de maíz y PBAT alrededor del cuarto mes de observación, es necesario tener en cuenta que los niveles de degradación van a ser menores a los que se podrían llevar a cabo en una composta, principalmente porque el oxígeno juega un papel importante en este proceso, además de la temperatura, el pH, la humedad, etc. Además, es claro que la degradación de los plásticos compostables también implica

factores intrínsecos del mismo material, como su composición, cristalinidad, espesor, presencia o ausencia de aditivos, etc.

Sobre los lixiviados, se hizo una comparación entre las concentraciones descritas por Tchobanoglous et al., en 1994 para rellenos sanitarios y los resultados obtenidos durante el segundo mes de observación, mismos que se manifiestan en la Tabla 6.1, en ella se puede verificar que los valores obtenidos dentro del experimento son muy parecidos a los reportados para un relleno sanitario joven. Durante la etapa más temprana de acondicionamiento y asentamiento, los residuos y su interacción pueden propiciar el incremento de los parámetros y es importante recalcar que, de no ser manipulados de manera adecuada, pueden generar impactos ambientales negativos, es por ello que, dentro de los rellenos sanitarios se debe incorporar la infraestructura apropiada con el fin de contener los lixiviados y, de esta forma, evitar que se percolen al medio.

Tabla 6.1. Comparación de los parámetros estudiados contra lo reportado por Tchobanoglous et al., 1994

Parámetro mg/L*	Tchobanoglous		Lixiviados mes 2
	Joven < 2 años	Maduro > 10 años	
pH	4.5-7.5	6.6-7.5	5.26
SS	200-2,000	100-400	1,283.50
DBO ₅	2,000-30,000	100-200	19,715
DQO	3,000-60,000	100-500	27,907

*excepto en pH

Es importante destacar que se ha promovido la fabricación, el comercio y el uso de plásticos degradables sin el debido cuidado y atención a todas aquellas consecuencias que se pueden desencadenar, en primer lugar hay un punto que es necesario integrar dentro de este apartado, ya que, a pesar de que en la CDMX se cuenta con normatividad vigente en el tema de especificaciones técnicas y de los métodos de prueba necesarios para asegurar que los plásticos de un solo uso son realmente compostables ha quedado comprobado, al menos en este trabajo, que algunos materiales que actualmente están en el mercado no lo son y esto es una llamada de atención también para las autoridades, porque si existen las normativas son para hacerlas cumplir, por ello es necesario que sean más enérgicas al respecto, de esta manera se evitará que existan más repercusiones al ambiente.

Otro punto es la falta de información digerible para la sociedad y también para los tomadores de decisiones, ya que si bien, existen muchos artículos sobre el tema, la mayoría recaen en el ámbito científico con tecnicismos muy de nicho, que dificultan la comprensión completa de la información o que no se encuentra al alcance de toda la población. Una opción sería generar campañas de concientización en el uso de los materiales plásticos degradables y, específicamente de los

compostables, desde la generación de los residuos, la separación, la elección y el uso de las bolsas, su transporte y disposición final.

Por último, hay que recalcar que si bien, puede llegar a presentarse cierto nivel de degradación en algunos tipos de bolsas compostables dentro de los rellenos sanitarios, esto no significa que sea la opción ideal para su disposición final, ya que su integración puede generar resultados no deseados y/o esperados, por ejemplo, se puede incrementar la producción de metano, aumentar la complejidad de los lixiviados y se puede incrementar la tendencia a la presencia de microplásticos.

7. CONCLUSIONES

Las conclusiones generadas después del análisis de los resultados obtenidos durante todo el desarrollo experimental (de manera preliminar y después de los seis meses de observación), se enlistan a continuación:

- En primer lugar, se realizó un modelo experimental, de manera teórica y después práctica con las condiciones necesarias para acoplarse lo más parecido a la realidad de lo que se vería en un relleno sanitario. Se utilizaron lisímetros de acrílico con las siguientes medidas: 0.53 m de alto con un diámetro interior de 0.48 m y exterior de 0.59 m; se incorporaron residuos sólidos urbanos tanto de la fracción orgánica (mismos que se dispusieron dentro de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables) y de la fracción inorgánica (los cuales fueron colocados alrededor de las muestras que se analizarían mes con mes). Fue colocado además, un drenaje para la recolección de los lixiviados que incluía la disposición de una capa de grava y la adecuación de una válvula al fondo del lisímetro, seguido por una capa impermeable que se realizó con la integración de un geotextil y una geomembrana. Los residuos fueron compactados tal como se haría en un relleno sanitario y, por último, se colocó una capa de cobertura de tierra que también fue compactada.
- Se analizaron cinco tipos de bolsas etiquetadas como compostables, tres fabricadas a base de fécula de maíz y ácido poliláctico, las cuales fueron identificadas como Ecoalternativas, Wentus y Tecflex, una bolsa fabricada de PBAT (Poli Butilén Adipato-co-Tereftalato) y comercializada por Grupo Eme y, por último, bolsas recolectadas de un Supermercado de la Ciudad de México, de las cuales se desconocía su composición pero que estaban etiquetadas como compostables bajo la EN 13432 (“Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación”). Además se incluyeron dos controles, uno de Polietileno de Alta Densidad (PAD) y otro de papel.
- Después de una intensiva búsqueda y comparación de distintos textos científicos, se eligieron cuatro pruebas para evaluar el nivel de degradación de las bolsas de plástico etiquetadas como compostables, estas fueron el rendimiento másico, las características macro y microscópicas, la respuesta de sus espectros IR y las propiedades mecánicas. Asimismo, se evaluaron los lixiviados generados durante la época de lluvia para verificar el funcionamiento del relleno sanitario, revisando parámetros como pH, temperatura, conductividad, DBO₅, DQO, Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales; cabe señalar que debido a que la evapotranspiración supera a la precipitación solamente se pudo recolectar la cantidad de lixiviados necesaria para los análisis en dos ocasiones, durante el primer y segundo mes de observación.

- Hay que señalar que, debido a las condiciones de evapotranspiración y de precipitación que prevalecieron en el sitio de estudio, no fue posible continuar con el análisis de los lixiviados, sin embargo, se obtuvieron los resultados que se esperarían dentro de los rellenos sanitarios, principalmente el aumento en las concentraciones de todos los parámetros. Es claro que el seguimiento y control de los lixiviados dentro de este tipo de sitios de disposición final es indispensable para evitar daños y repercusiones al ambiente
- De acuerdo con los análisis realizados, se puede aseverar que la mayoría de las bolsas etiquetadas como compostables que fueron evaluadas (Ecoalternativas, Wentus, Tecflex y Grupo Eme) presentaron un cierto nivel de degradación. Como era de esperarse, el control de papel desapareció en su totalidad. Sobre el control de PAD y la bolsa del Supermercado no se encontró evidencia de degradación, esto se detalla más adelante.
- La mayoría de las bolsas etiquetadas como compostables están fabricadas con fécula de maíz y ácido poliláctico (Ecoalternativas, Wentus y Tecflex). Estos materiales demostraron signos de degradación a partir del cuarto mes de observación; en primer lugar con la disminución en el porcentaje de transmitancia inicial de un 11%. En segundo lugar con la pérdida de su masa inicial, ya que ésta tuvo una variación de entre el 31 y 59%. Como tercer lugar se tiene el cambio en sus propiedades mecánicas, en donde se demostró que estas bolsas sufrieron una deformación mayor (de entre el 62 y 65% más que al inicio) con un esfuerzo muchísimo menor (entre 59 y 80% menos que en la prueba preliminar), por último, es evidente el cambio en sus características macro y microscópicas, pues la mayoría de los materiales sufrieron distintos desgastes en forma de orificios, desgarraduras, fracturas y en el cambio de su coloración. Es por esto que se puede asegurar que estos materiales pueden comenzar su proceso de degradación alrededor de los 120 días de su disposición final.
- La bolsa etiquetada como compostable de Grupo Eme está fabricada a base de Poli(Butilén Adipato-co-Tereftalato) (PBAT) y queda demostrado en la respuesta de su espectro. Esta bolsa ha manifestado que, aproximadamente a los 90 días, puede empezar su proceso de degradación en rellenos sanitarios y esto queda demostrado en la disminución de su porcentaje de transmitancia inicial a un 13%; tuvo una pérdida en su masa inicial de alrededor del 33%. Además, se observó un cambio en sus propiedades mecánicas evidenciado en una deformación mayor (de 87% más que al inicio) con un esfuerzo muchísimo menor (60% menos que en la prueba preliminar), por último, es evidente el cambio en sus características macro y microscópicas, ya que la película plástica sufrió en la mayor parte de su superficie distintos desgastes en forma de orificios, desgarraduras, fracturas y en el cambio de su coloración.

- Es importante señalar que no todas las bolsas etiquetadas como compostables realmente lo son, es el caso de la bolsa del Supermercado, misma que mostró evidencia de haber sido fabricada con polietileno, debido a que la respuesta de su espectro IR es bastante similar al espectro que se obtuvo del control de PAD. Por otro lado, en los resultados del rendimiento másico su pérdida en peso no supero el 5%; asimismo, sus propiedades mecánicas no tuvieron una variación significativa en su deformación más allá del 0.5%. Por último, sus características macro y microscópicas no presentaron un cambio real, solamente se observó una pérdida en el brillo del material pero no presentó ni una sola muestra de orificios, desgarramientos o fracturas, además se conservó la leyenda sobre la EN 13432.
- A pesar de que se ha promovido la fabricación, el comercio y el uso de plásticos degradables esto se ha hecho sin el debido cuidado y atención a todas aquellas consecuencias que se pueden desencadenar, por ejemplo, en la CDMX se cuenta con normatividad vigente en el tema de especificaciones técnicas y en cuanto a los métodos de prueba necesarios para asegurar que los plásticos de un solo uso son realmente compostables, sin embargo, ha quedado comprobado, al menos en este trabajo, que algunos materiales que actualmente están en el mercado no lo son, por esta razón se le hace un llamado de atención a la SEDEMA y las autoridades en general para que sean más enérgicas al respecto y no condonen a los fabricantes y/o comercializadores que están cayendo en una contradicción al llamarse empresas verdes, ya que solo de esta manera se evitará que existan más repercusiones al ambiente.
- Por otro lado, la falta de información digerible para la sociedad y también para los tomadores de decisiones, es algo que se debe empezar a cambiar, ya que si bien, existen muchos artículos sobre el tema, la mayoría recaen en el ámbito científico con tecnicismos muy de nicho, que dificultan la comprensión completa de la información o que no se encuentra al alcance de toda la población. Por lo que se recomienda generar campañas de concientización sobre el uso de los materiales plásticos degradables y, específicamente de los compostables, desde la generación de los residuos, la separación, la elección y el uso de las bolsas, su transporte y disposición final, de esta manera se evitaren contradicciones, falsas expectativas y minimización de impactos.
- Por último, dejar muy en claro que si bien, es posible que se lleve a cabo la degradación de las bolsas compostables en los rellenos sanitarios, no necesariamente será completa, además el que se comience el proceso de degradación no significa que sea la opción ideal para su disposición final, ya que el integrarlas desmedidamente dentro de los rellenos puede generar resultados no deseados y/o esperados, por ejemplo, se puede incrementar la producción de metano, aumentar la complejidad de los lixiviados, se puede incrementar la tendencia a la presencia de microplásticos y/o además, se pueden presentar cambios en la temperatura normal del relleno.

REFERENCIAS

1. Abc-pack (2021). *¿Cómo se hace una bolsa de plástico?* <https://www.abc-pack.com/enciclopedia/como-se-hace-una-bolsa-de-plastico/> (consultado el 02 de noviembre de 2021).
2. Accinelli C., Abbas H. K., Bruno V., Nissen L., Vicari A., Bellaloui N., Little N. S. y Thomas W. (2020). *Persistence in soil of microplastic film from ultra-thin compostable plastic bags and implications on soil Aspergillus flavus population*. Elsevier-Waste Management, 113, 312-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.011>
3. Accinelli C., Saccá M. L. Mencarelli M. y Vicari A. (2012). *Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative*. Elsevier-Chemosphere, 89, 116-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.028>
4. Adamcová D., Vaveková M. D., Mašíček T. y Břoušková E. (2016). *Analysis of biodegradability of degradable/biodegradable plastic material in controlled composting environment*. Journal of Ecological Engineering, 17(4), 1-10
5. Adamcová D., Vaveková M. D. (2016). *New Polymer Behavior Under the Landfill Conditions*. Springer, Waste Biomass Valor, 7, 1459-1467.
6. Aliani, S., and Molcard, A. (2003). Hitch-hiking on floating marine debris: Macrobenthic species in the western Mediterranean Sea. *Hydrobiologia* 503, 59-67. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.00000008480.95045.26>
7. Ali Y., Sara S. y Rehman O. (2021). *How to tackle plastic bags and bottles pollution crisis in Pakistan? A cost-benefit analysis approach*. Environmental and Ecological Statistics, 28, 697-727. <https://doi.org/10.1007/s10651-021-00511-6>
8. Alimba, C.G. and Faggio. C. (2019). Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 68, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.001>.
9. American Society for Testing Materials. (2004). ASTM D6400. *Standard Specification for Compostable Plastics*.
10. American Society for Testing Materials. (2015). ASTM D5338. *Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures*.
11. American Society for Testing Materials. (2018). ASTM D6287. *Standard Practice for Cutting Film and Sheeting Test Specimens*
12. American Society for Testing Materials. (2018). ASTM D882. *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*.
13. American Society for Testing Materials. (2021). ASTM D8410. *Standard Specification for Evaluation of Cellulosic-Fiber-Based Packaging Materials and Products for Composability in Municipal or Industrial Aerobic Composting Facilities*.

14. Anbumani, S. and Kakkar, P. (2018). Ecotoxicological effects of microplastics on biota: A review. *Environmental Science and Pollution Research* 25, 14373- 14396. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1999-x>
15. Aparicio F. J. (2007). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México. Limusa
16. Artru M. y Lecerf A. (2019). *Slow degradation of compostable plastic Carrier bags in a stream and its riparian area*. *Ann. Limnol*, 55(18), 1-7. <https://doi.org/10.1051/limn/2019017>
17. Asociación Española de Normalización. (2001). UNE-EN 13432. *Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje*.
18. Barbosa R. F. S., De Souza A. G., Rosa D. S. (2019). *Desenvolvimento de cápsulas poliméricas de PBAT com incorporaçõ de óleos essenciais*. 15º Congreso Brasileiro de Polímeros. Brasil
19. Bátori V., Akesson D., Zamani A., Taherzadeh M. y Horváth I. S. (2018). *Anaerobic degradation of plastics: a review*. *Elsevier-Waste Management*, 80, 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.040>
20. Boonmee C., Kositanont C. y Leejarkpai T. (2016). *Degradation of Poly (lactic acid) under Simulated Landfill Conditions*. *Environment and Nature Resources Journal*, 14(2), 1-9. DOI: 10.14456/enrj.2016.8
21. Bonten, Christian (2019). *Plastics Technology, introduction and fundamentals*. Alemania. Hanser Publications.
22. Boucher J., Zgola M., Liao X., Kounina A., Billard G., Paruta P., Bouchet A. (2020). *National guidance for plastic pollution hotspotting and shaping action*. UNESCO-UNEP.
23. Briassoulis, D. (2013). *Review, mapping and analysis of the agricultural plastic waste generation and consolidation in Europe*. *Waste, management and research*.
24. Cadena Calvachi, D. V. (2014). *Estudio de la biodegradación de cuatro tipos de bolsas oxo-biodegradables empleadas en la venta de productos, utilizando tierra compostable fresca, fresca más aireación y madura, simulando condiciones ambientales de humedad y temperatura del relleno sanitario ubicado en Quito* [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana de Quito].
25. Cámara de Diputados (2019). *Prohibición del uso de bolsas de plástico, derecho comparado a nivel internacional y estatal*. SAPI-ISS-20-19. México.
26. Canevarollo, Sebastiao V. (2020). *Polymer Science, a textbook for engineers and technologists*. Hanser Publications.
27. Ccallo-Arelas, M., Sacaca-Mascos, F., Callata-Churac, R. A., Vigo-Riveras, J. E., Calla-Calla, J. (2020). *Biodegradación de polímeros de plástico por Pseudomonas*. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 6(2), 46-59.

28. Cox, K., Covernton, A., Davies, H., Dower, J., Juanes, F. and Dudas, S. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science and Technology* 53(12), 7068-7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>.
29. Deloitte (2019). The Price Tag of Plastic Pollution: An Economic Assessment of River Plastic. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/strategy-analytics-and-ma/deloitte-nl-strategy-analytics-and-ma-the-price-tag-of-plastic-pollution.pdf>.
30. Dirección de Investigación de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión. Lima - Perú46
31. Chang, R. y Goldsby, K. (2010). *Química*. 11ª ed. México: McGraw-Hill.
32. Chuc Velasco, B.I. (2008). *Criterios Ambientales para la selección de un sitio de Relleno Sanitario* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
33. Delgado, C. A. (2019). *Biodegradabilidad de agroplásticos utilizados en la agricultura protegida en el campo mexicano*. [Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México].
34. DOF. *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México. 1988. (Última reforma 4 junio 2012).
35. DOF. *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos*. México. 2003 (8 de octubre).
36. DOF. 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*. 2003 (aprobada el 09 de junio de 2004).10
37. DOF. NMX-AA-61-1985 Protección al Ambiente - *Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales- Determinación de la Generación*. México. 1985 (8 de agosto).
38. Ehman N. y Area M. C. (2021). *Bioplastics are revolutionizing the packaging industry*. *Bioresources*, 16(3), 4663-4666.
39. Excel Microsoft, 2021.
40. Fernando A. Quirós J., López J. (2014). *Análisis de la biodegradabilidad de una bolsa compostable formada por una mezcla de copoliéster y ácido poliláctico bajo condiciones anaerobias controladas: ISO 15985:2004*. Universidad Politécnica de Madrid. Congreso Nacional del Medio Ambiente
41. Gaceta Oficial de la Ciudad de México (GOCDMX). Norma ambiental para la Ciudad de México NACDMX-010-AMBT-2019. *Especificaciones técnicas que deben cumplir las bolsas y los productos plásticos de un solo uso compostables y/o reutilizables*. México. 2021 (aprobada el 25 de febrero de 2022).
42. Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF). *Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal* (13 de enero 2000).
43. Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF). *Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal* (Última reforma 25 de junio de 2019).

44. Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF). *Reglamento de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal* (Última reforma 19 de febrero de 2020).
45. Galindo O. M. (2009). *Diseño del relleno sanitario intermunicipal para los municipios de Atoyac de Álvarez-Benito Juárez y Técpan*. [Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México].
46. Góngora J.P. (2014). *La industria del plástico en México y el mundo*. Comercio exterior, 64(5), 6-9.
47. Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México. Mc Graw Hill, 3ª edición.
48. Guerrero-Cabrera, J. P., Cabello-Torres, R., Garzon-Flores, A., Reynoso Quispe, P., Valdiviezo-Gonzales, L. (2022). *Aplicación de microorganismos fúngicos para la degradación “in vitro” de polímeros sintéticos*. 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology. DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.155> ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390.
49. Gutiérrez M., López L., Arellano L., & Ochoa A. (2009). *Química orgánica. Aprende haciendo*. México: Pearson.
50. Khoo H. H., Tan R. B. (2009). *Environmental impacts of conventional plastic and bio-based carrier bags*. The International Journal of Life Cycle Assessment. Springer. 15 (4). 338-345. DOI 10.1007/s11367-010-0163-8.
51. International Organization for Standardization. (2012). ISO 14855. *Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions — Method by analysis of evolved carbon dioxide*.
52. International Organization for Standardization. (2021). ISO 16929. *Determination of the degree of disintegration of plastic materials under defined composting conditions in a pilot-scale test*.
53. International Organization for Standardization. (2021). ISO 17088. *Plastics — Organic recycling — Specifications for compostable plastics*.
54. Jiménez, J. E. (2015). *Evaluación de la termodegradación y toxicidad del plástico no biodegradado presente en composta*. [Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México].
55. Landrigan, P.J., Stegeman, J., Fleming, L., Allemand, D., Anderson, D., Backer, L. et al. (2020) Human health and ocean pollution. *Annals of Global Health* 86(1) 151, 1-64. <https://doi.org/10.5334/aogh.2831>
56. León A. G. (2018). *Un mundo plastificado, propuesta de difusión sobre la contaminación del plástico. Proyecto para la UNESCO*. [Tesina de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.]
57. Lewis H., Verghese K. y Fitzpatrick L. (2010). *Evaluating the sustainability impacts of packaging: the plastic carry bag dilemma*. *Packaging Technology and Science*, 23, 145-160. DOI: 10.1002/pts.886

58. Manabu M., Branciforti M. C., Montagnolli R. N., Marin M. A., Jacobus A. P., Brienzo M. (2022). *Production and assessment of the biodegradation and ecotoxicity of xylan-and starch-based bioplastic*. Elsevier-Chemosphere, 287, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132290>.
59. Matsuyama S., Takizawa Y., Tanabe K., Tamara T. (2022). Spectral Database of Organic Compounds (SDBS). https://sdfs.db.aist.go.jp/sdfs/cgi-bin/cre_index.cgi
60. Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización*. Mc Graw-Hill.
61. Mexpolimeros, *Poli-butilén adipato-co-tereftalato (PBAT)*. <https://www.mexpolimeros.com/pbat.html> (consultado el 02 de noviembre de 2021).
62. Microsoft Excel (v. 2021).
63. Mistriotis A., Briassoulis D., Giannoulis A. y D'Aquino S. (2016). *Design of biodegradable bio-based equilibrium modified atmosphere packaging (EMAP) for fresh fruits and vegetables by using micro-perforated poly-lactic acid (PLA) films*. Elsevier-Postharvest biology and technology, 111, 390-389. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.09.022>
64. Mondragón, P. (2017). *Espectroscopía de infrarrojo para todos... y 51 espectros de alimentos consumidos en México*. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. ISBN 978-607-97548-4-6
65. Moran M.E. (2018). *An environmental and cost comparison between polypropylene plastic drinking straws and "greener" alternative: an Oberlin case study*. Honors papers. Estados Unidos.169.
66. Muenmee, S.; Chiemchaisri, W.; Chiemchaisri, C. Microbial consortium involving biological methane oxidation in relation to the biodegradation of waste plastics in a solid waste disposal open dump site. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2015, 102, 172–181.
67. Napper I. y Thompson R. (2019). *Environmental deterioration of biodegradable, oxo-biodegradable, compostable, and conventional plastic Carrier bags in the sea, soil and open-air over 3-year period*. *Environmental Science & Technology*. 53, 4775-4783.
68. Nar M. (2019). *Plastic bag regulations for a sustainable environment*. *International Journal of Contemporary Economics and Administrative Sciences*, 9(2), 305-326. DOI: 10.5281/zenodo.3596081.
69. Normas APA, 7a edición, (consultadas el 16 de agosto de 2021 <https://normas-apa.org/>)
70. NYCE, Norma Mexicana NMX-E-273-NYCE-2019: Industria del Plástico- *Plásticos compostables-Especificaciones y métodos de prueba*.
71. Observatorio Meteorológico de la UNAM (2022). Datos meteorológicos históricos en Ciudad Universitaria. México.
72. OCDE (2013). *Evaluaciones de la OCDE sobre el desempeño ambiental: México 2013*. OECD Publishing. ISBN 978-92-64-18906-5 (impreso) ISBN 978-92-64-18918-8 (PDF).
73. OCDE (22 de febrero de 2022). *La contaminación por plástico crece sin cesar, en tanto que la gestión de residuos y el reciclaje se quedan cortos*.

<https://www.oecd.org/espanol/noticias/perspectivas-globales-del-plastico.htm#:~:text=22%2F02%2F2022%20%2D%20El,nuevo%20reporte%20de%20la%20OCDE.>

74. ONU (2018). *El estado de los plásticos, perspectiva del día mundial del medio ambiente 2018*. <https://www.unep.org/es/resources/informe/el-estado-de-los-plasticos-perspectiva-del-dia-mundial-del-medio-ambiente-2018>
75. ONU (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*. Nueva York, Estados Unidos.
76. ONU Medio Ambiente (12 de mayo de 2017). *La ONU lucha por mantener los océanos limpios de plásticos*. <https://news.un.org/es/story/2017/05/1378771>
77. ONU Medio Ambiente (15 de marzo de 2019). *Compromiso mundial para reducir los plásticos de un solo uso*. <https://news.un.org/es/story/2019/03/1452961>
78. ONU-PNUMA (2018). *Prohibición de plásticos de un solo uso, conjunto de directrices para la Sostenibilidad*.
79. ONU-PNUMA (2019). *Resolución aprobada por la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente el 15 de marzo de 2019*. UNEP/EA.4/RES.6.
80. ONU-PNUMA (2021). *From Pollution to Solution. A global assessment of marine litter and plastic pollution Nairobi*. UNEP. ISBN: 978-92-807-3881-0
81. ONU-PNUMA (20 de diciembre de 2021). *La historia de la bolsa de plástico, desde su nacimiento hasta su prohibición*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/la-historia-de-la-bolsa-de-plastico-desde-su-nacimiento-hasta-su>
82. ONU-PNUMA (2 de marzo de 2022). *Día histórico en la campaña para combatir la contaminación por plásticos: naciones se comprometen a elaborar un acuerdo jurídicamente vinculante*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/dia-historico-en-la-campana-para-combatir-la>
83. Portal Datos Mundial.com (2022). *Horas de luz solar en México*. <https://www.datosmundial.com/america/mexico/puesta-del-sol.php>
84. Quecholac X., Hernández M. C., Mañón M. C., Espinosa R. M. y Vázquez A. (2021). *Degradation of Plastics in Simulated Landfill Conditions*. *Polymers*, 13, 1014. <https://doi.org/10.3390/>
85. Ritch E., Brennan C. y MacLeod C. (2009). *Plastic bag politics: modifying consumer behavior for sustainable development*. *International Journal of Consumer Studies*, 33, 168-174. ISSN 1470-6423.
86. Romero R. (2016). *Planeación y programación de la producción de bolsas de polietileno mediante programación lineal y entera mixta*. [Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México].
87. Science History Institute. (2021). *Leo Hendrik Baekeland* (consultado el 16 de octubre de 2021).

88. SEDEMA (2021). *Sobre lo compostable... ¿Qué es un plástico compostable?* <http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx:8081/culturaambiental/index.php/sobre-lo-compostable> (consultado el 02 de noviembre de 2021).
89. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2009). *Manual de especificaciones técnicas para la construcción de rellenos sanitarios para RSU y RME. Dirección General de Fomento Ambiental Urbano y Turístico.*
90. Siyamak S., Ibrahim N. A., Abdolmohammadi S., Yunus Z. W., Rahman M. Z. (2012). *Effect of Fiber Esterification on Fundamental Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber/Poly (butylene adipate-co-terephthalate) Biocomposites. International Journal of Molecular Sciences, 13,1327-1346. doi:10.3390/ijms13021327*
91. Standars Australia. (2006). AS 4736. *Biodegradable plastics - Biodegradable plastics suitable for composting and other microbial treatment.*
92. Standars Australia. (2010). AS 5810. *Biodegradable plastics - Biodegradable plastics suitable for home composting*
93. Tchobanoglous, G. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos.* McGraw-Hill.
94. Tecnología de los plásticos (2012). <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/04/extrusion-de-pelicula-soplada.html>
95. The World Bank Group. *What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*; World Bank Group: Washington, DA, USA, 2020.
96. Thornthwaite C. W. (1948). Método del Balance de Agua. Resumen realizado por la Comisión de cooperación Ecológica Transfronteriza e INCREMI, S.A de C.V.
97. Treviño, N. N. (2016). *Propuesta de gestión para la disposición final de las bolsas plásticas oxobiodegradables de baja densidad presentes en los residuos sólidos urbano.* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].
98. Unidad de Materiales, UMAT. (2019). *Espectroscopía de infrarrojo.* Portal del Centro Público de Investigación del Sistema CONACYT.
99. Valero M., Ortegón Y., Uscategui Y. (2013). Biopolímeros: avances y perspectivas. *Dyna/Scielo, 80(181) 171-180. ISSN 0012-7353*
100. Vasil A. (2019). *Can plant-based plastics dig us out of waste crisis?* Corporate Knights Magazine. 20-23
101. Vázquez A., Beltrán M., Espinosa R. M. y Velasco M., (2021) *¿Son tóxicos los plásticos?* Universidad Autónoma Metropolitana y Asociación Nacional de Industrias del Plástico.
102. Vázquez A., Beltrán M., Espinosa R., Velasco M., (2021). *El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente.* Universidad Autónoma Metropolitana y Asociación Nacional de Industrias del Plástico.
103. Vázquez A., Espinosa R. M., Beltrán M. y Velasco M., (2021). *Bioplásticos y plásticos degradables.* Universidad Autónoma Metropolitana y Asociación Nacional de Industrias del Plástico.

104. Vázquez A., Sotelo P., Espinosa R., Velasco M., Quecholac X., Beltrán M., Álvarez J. (2018). *Degradación y biodegradación de plásticos*. Resumen ejecutivo. Asociación Nacional de la Industria Química y Comisión de la Industria del Plástico.
105. Villacreses J. F., Vásquez C. J. y Cordero M. O. (2021). *Análisis de la metodología aplicada en la compactación del relleno sanitario de la ciudad de Jipijapa*. Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas, 14(1), 199-211. ISSN: 2306-2495.
106. Wagner T. P. (2017). *Reducing single-use plastic bags in the USA*. Elsevier-Waste Management, 70, 3-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.003>
107. Watson A. (2021). *Addressing single-use plastic products pollution, using a life approach*. UNESCO-UNEP. ISBN: 978-92-807-3841-4
108. Wu C. (2005). Improving polylactide/starch Biocomposites by grafting polylactide with acrylic acid-characterization and biodegradability assessment. *Macromolecular Bioscience*, 5(4), pp. 352-361.

ANEXOS

Anexo A

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

ÁREA: RESIDUOS SÓLIDOS

TEMA: ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE BOLSAS DE PLÁSTICO ETIQUETADAS COMO COMPOSTABLES EN RELLENOS SANITARIOS

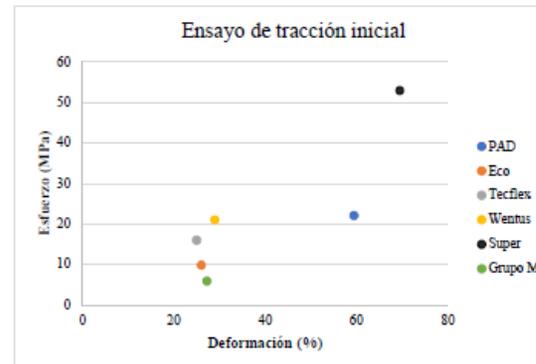
ANEXO A: BITÁCORA DE INFORMACIÓN SOBRE LAS MUESTRAS DE BOLSAS COMPOSTABLES

ING. MITZY JOSEFINA LÓPEZ LÓPEZ



PRUEBAS PRELIMINARES											
Proveedor	Medidas	Tipo	Fabricación	Clave	Módulo elástico, MPa	Máx. esfuerzo, MPa	Máx. desplazamiento, mm	Rotura de esfuerzo, MPa	Rotura de deformación, %	Máx. fuerza, N	Energía, J
-	77x46 cm y calibre de 1 mm	Camiseta	Poliétileno de Alta Densidad	PAD	297.858	22.079	59.335	10.768	59.491	40.378	5.935
Ecoalternativas S.A. de C.V.	31x38 cm con fuelle de 10 cm y calibre de grosor de 20µm	Camiseta	Fécula de maíz, PLA	Eco	212.004	9.848	13.086	6.87	26.086	4.1774	0.09
Grupo Eme S.A. de C.V.	0.34x3 m	Película plástica	PBAT	Grupo M	221.472	5.935	4.17	4.152	27.295	1.779	0.042
Tecflex S.A. de C.V.	28x20 cm	Estándar	Fécula de maíz, PLA	Tecflex	424.554	16.011	17.753	5.489	25.048	11.9154	0.646
Plásticos Wentus	38x24 cm	Camiseta	Fécula de maíz, PLA	Wentus	188.468	21.021	23.907	12.39	29.037	10.023	0.387
Supermercado	difiere en cada bolsa	En rollo	----	Super	1075.468	52.896	57.948	34.036	69.541	9.503	0.649

Código	Máx. esfuerzo, MPa	Rotura de deformación, %
PAD	22.079	59.491
Eco	9.848	26.086
Tecflex	16.011	25.048
Wentus	21.021	29.037
Super	52.896	69.541
Grupo M	5.935	27.295



Anexo A

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

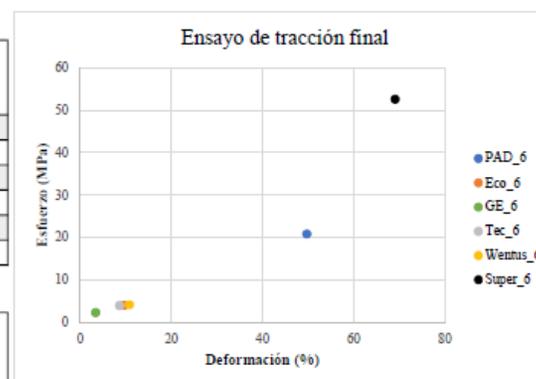
ÁREA: RESIDUOS SÓLIDOS
TEMA: ANALISIS DE LA DEGRADACION DE BOLSAS DE PLASTICO ETIQUETADAS COMO COMPOSTABLES EN RELLENOS SANITARIOS

ANEXO A: BITÁCORA DE INFORMACIÓN SOBRE LAS MUESTRAS DE BOLSAS COMPOSTABLES
ING. MITZY JOSEFINA LÓPEZ LÓPEZ



PRUEBAS MES 6											
Proveedor	Medidas	Tipo	Fabricación	Clave	Módulo elástico, MPa	Máx. esfuerzo, MPa	Máx. desplazamiento, mm	Rotura de esfuerzo, MPa	Rotura de deformación, %	Máx. fuerza, N	Energía, J
-	77x46 cm y calibre de 1 mm	Camiseta	Poliétileno de Alta Densidad	PAD_6	297.833	20.896	52.836	39.745	49.741	28.4245	5.475
Ecoalternativas S.A. de C.V.	31x38 cm con fuelle de 10 cm y calibre de grosor de 20µm	Camiseta	Fécula de maíz, PLA	Eco_6	92.269	4.075	9.253	2.806	9.67	1.5893	0.008
Grupo Eme S.A. de C.V.	0.34x3 m	Película plástica	PBAT	GE_6	150.129	2.398	2.42	1.646	3.42	0.9351	0.001
Tecflex S.A. de C.V.	28x20 cm	Estándar	Fécula de maíz, PLA	Tec_6	114.928	4.008	8.087	2.709	8.67	3.0062	0.009
Plásticos Wentus	38x24 cm	Camiseta	Fécula de maíz, PLA	Wentus_6	94.43	4.247	9.963	3.132	10.881	3.411	0.187
Supermercado	difiere en cada bolsa	En rollo	----	Super_6	1075.214	52.604	57.669	33.945	69.169	9.4688	0.578

Código	Máx. esfuerzo, MPa	Rotura de deformación, %
PAD_6	20.896	49.741
Eco_6	4.075	9.67
GE_6	2.398	3.42
Tec_6	4.008	8.67
Wentus_6	4.247	10.881
Super_6	52.604	69.169



Bolsas	Preliminar		Mes 6		Diferencia esfuerzo, %	Diferencia deformación, %
	Máx. esfuerzo, MPa	Rotura de deformación, %	Máx. esfuerzo, MPa	Rotura de deformación, %		
PAD	22.079	59.491	20.896	49.741	5.3580	16.3890
Ecoalternativas	9.848	26.086	4.075	9.67	58.6210	62.9303
Tecflex	16.011	25.048	4.008	8.67	74.9672	65.3865
Wentus	21.021	29.037	4.247	10.881	79.7964	62.5271
Grupo Eme	5.935	27.295	2.398	3.42	59.5956	87.4702
Supermercado	52.896	69.541	52.604	69.169	0.5520	0.5349

Anexo B

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ÁREA: RESIDUOS SÓLIDOS
TEMA: ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE BOLSAS DE PLÁSTICO ETIQUETADAS
COMO COMPOSTABLES EN RELLENOS SANITARIOS
ANEXO B: BITÁCORA PRELIMINAR DEL ESTADO FÍSICO DE LAS BOLSAS
ING. MITZY JOSEFINA LÓPEZ LÓPEZ

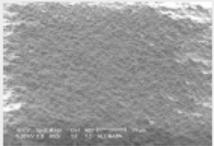
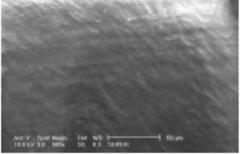
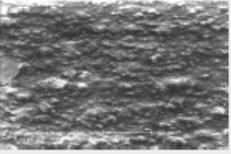


Preliminar			
Clave	Observaciones		Reporte fotográfico
	<i>Análisis macroscópico</i>	<i>Análisis microscópico</i>	
<i>PAD</i>	<p>Áspera al tacto, claramente es la más gruesa de todas y la segunda más opaca. Presenta dobleces típicos resultado del almacenaje, sin embargo, no presenta ningún tipo de rasgadura, grieta, orificio o desgaste</p>	<p>El control de PAD fue la muestra más difícil de ver al microscopio, asumimos que fue debido al material del que está hecho; en casi toda el área analizada se podían observar manchas alargadas muy oscuras</p>	
<i>Eco</i>	<p>Es bastante gruesa y tersa al tacto, no presenta texturas, es de color blanco y es muy flexible. Presenta dobleces típicos resultado del almacenaje, sin embargo, no presenta ningún tipo de rasgadura, grieta, orificio o desgaste</p>	<p>Se observa un patrón muy bien definido a lo largo de la misma, similar al de los arrecifes, sin ninguna alteración en el material</p>	
<i>Tecflex</i>	<p>Tiene un color beige translúcido, es bastante delgada, suave al tacto y no presenta texturas. Presenta dobleces típicos resultado del almacenaje, sin embargo, no presenta ningún tipo de rasgadura, grieta, orificio o desgaste</p>	<p>Presenta un patrón más terso que el de Ecoalternativas, pero no se observan desgarramientos o roturas en sus materiales</p>	

Anexo B

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ÁREA: RESIDUOS SÓLIDOS
TEMA: ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE BOLSAS DE PLÁSTICO ETIQUETADAS
COMO COMPOSTABLES EN RELLENOS SANITARIOS
ANEXO B: BITÁCORA PRELIMINAR DEL ESTADO FÍSICO DE LAS BOLSAS
ING. MITZY JOSEFINA LÓPEZ LÓPEZ



Preliminar			
<i>Clave</i>	Observaciones		<i>Reporte fotográfico</i>
	<i>Análisis macroscópico</i>	<i>Análisis microscópico</i>	
<i>Wentus</i>	Es un poco más gruesa que la de Ecoalternativas, presenta una coloración verde, es tersa al tacto, no presenta texturas y es menos flexible que la anterior. Presenta dobleces típicos resultado del almacenaje, sin embargo, no presenta ningún tipo de rasgadura, grieta, orificio o desgaste	Presenta un patrón más terso que el de Ecoalternativas, pero no se observan desgarramientos o roturas en sus materiales	 
<i>Supermercado</i>	Es transparente, da una sensación grasosa, menos flexible que las dos anteriores, además es más delgada. Presenta dobleces típicos resultado del almacenaje, sin embargo, no presenta ningún tipo de rasgadura, grieta, orificio o desgaste	Es la que tiene una morfología más suave que el resto, mostrándose algunas bandas horizontales	 
<i>Grupo Eme</i>	Es muy suave al tacto, de un color blanco translúcido, flexible, sin textura y es la más delgada de todas. Presenta dobleces típicos resultado del almacenaje, sin embargo, no presenta ningún tipo de rasgadura, grieta, orificio o desgaste	Presenta una morfología lenticular y menos tersa que la dos anteriores	 

Anexo C

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ÁREA: RESIDUOS SÓLIDOS
TEMA: ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE BOLSAS DE PLÁSTICO
ETIQUETADAS COMO COMPOSTABLES EN RELLENOS SANITARIOS
ANEXO C: BITÁCORA RENDIMIENTO MÁSCO
ING. MITZY JOSEFINA LÓPEZ LÓPEZ



<i>Clave</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso mes 1 (g)</i>	<i>Peso mes 2 (g)</i>	<i>Peso mes 3 (g)</i>	<i>Peso mes 4 (g)</i>	<i>Peso mes 5 (g)</i>	<i>Peso mes 6 (g)</i>
<i>PDA</i>	79.90	79.43	79.38	79.21	79.13	79.12	79.11
<i>Eco</i>	10.55	9.54	9.43	9.28	4.43	4.38	4.30
<i>Tecflex</i>	4.51	4.51	3.94	3.73	3.53	3.21	3.12
<i>Wentus</i>	9.90	9.63	9.63	9.61	8.46	6.68	6.10

<i>Lisímetro 1</i>		
<i>Clave</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso mes 1 (g)</i>
<i>Super</i>	6.42	6.34
<i>GE</i>	7.42	7.3

<i>Lisímetro 2</i>		
<i>Clave</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso mes 2 (g)</i>
<i>Super</i>	2.93	2.87
<i>GE</i>	8.92	8.43

<i>Lisímetro 3</i>		
<i>Clave</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso mes 3 (g)</i>
<i>Super</i>	3.74	3.63
<i>GE</i>	5.36	3.99

<i>Lisímetro 4</i>		
<i>Clave</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso mes 4 (g)</i>
<i>Super</i>	2.93	1.99
<i>GE</i>	10.42	8.91

8.3. Anexo C

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 POSGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL
 ÁREA: RESIDUOS SÓLIDOS

TEMA: ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE BOLSAS DE PLÁSTICO
 ETIQUETADAS COMO COMPOSTABLES EN RELLENOS SANITARIOS



ANEXO C: BITÁCORA RENDIMIENTO MÁSIICO
 ING. MITZY JOSEFINA LÓPEZ LÓPEZ

<i>Lisímetro 5</i>		
<i>Clave</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso mes 5 (g)</i>
<i>Super</i>	2.34	1.62
<i>GE</i>	9.57	5.78

<i>Lisímetro 6</i>		
<i>Clave</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso mes 6 (g)</i>
<i>Super</i>	1.78	1.69
<i>GE</i>	9.24	6.23

<i>Código</i>	<i>Peso inicial (g)</i>	<i>Peso mes 6 (g)</i>	<i>% pérdida</i>
<i>PAD</i>	79.90	79.11	0.99
<i>Eco</i>	10.55	4.30	59.24
<i>Tecflex</i>	4.51	3.12	30.82
<i>Wentus</i>	9.90	6.10	38.38
<i>Super</i>	1.78	1.69	5.06
<i>GE</i>	9.24	6.23	32.58

