

**REVISIÓN DE ESTÁNDARES INTERNACIONALES PARA LA PRODUCCIÓN DE
PLÁSTICOS OXO-BIODEGRADABLES**

**JULIANA ÁLVAREZ CHIAPPE
LUIS FERNANDO CELIS ANDRADE**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de:
Ingeniero Químico**

**Director
Luis David Gómez Méndez. Ph. D
Microbiólogo**

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA INGENIERIA QUIMICA
BOGOTA D.C
2021**

Nota de Aceptación
(Dirección de Investigadores)

Nombre
Firma del Director

Firma Docente Investigador

Firma Docente Jurado 1

Firma Docente Jurado 2

Bogotá, D.C., Febrero 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARIA CLAUDIA APONTE GONZALES

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMAN

Decano Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Dra. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres, por darme la oportunidad de estudiar la carrera de mi elección, por apoyarme en cada momento y cuidarme siempre. Gracias porque siempre me han ofrecido lo mejor, y sobre todo agradezco a Dios y la vida por permitirme aun compartir con ustedes, en mi corazón siempre recordarme que soy la historia más linda que Dios escribió en sus vidas y que así me lo hicieron saber.

A mi compañero Luis Fernando Celis, porque aún recuerdo la primera vez que nos conocimos en primer semestre, y nunca pensé que fuéramos a terminar este camino profesional juntos, gracias por estos 5 años de amistad basada en el respeto y la honestidad. Y sobre todo por tenerme paciencia en muchas ocasiones, y apoyarnos mutuamente a pesar de la situación presentada al momento de graduarnos.

Al profesor Luis David Gómez por darnos la oportunidad de hacer parte de El semillero de investigación “degradación de polímeros plásticos contaminantes “de la Universidad Javeriana, y así mismo por dirigirnos y siempre estar dispuesta a resolvernos todas las inquietudes a lo largo del desarrollo del proyecto, con el fin de guiarnos y exigirnos como debió ser.

A mi primera amiga de la universidad y hoy en día una de mis mejores amigas Edna Manrique, y así mismo a personas maravillosas que conocí a lo largo de este camino como lo fueron Daniel Andrade y Daniel Vargas, con los cuales vivimos experiencias inolvidables. Me llena de orgullo haberlos conocido y saber que cuento con ustedes en momentos difíciles, gracias a cada uno nombrado anteriormente por su lealtad y siempre les deseare éxitos y bendiciones en sus futuros proyectos.

Y por último agradezco a Sofía Loaiza, una de las personas más honorables que he podido conocer, gracias por darme la oportunidad de ser tu amiga, por absolutamente cada detalle que has tenido conmigo, cada experiencia y locura que hemos vivido juntas. Gracias por guiarme y corregirme con el objetivo de ser mejor persona. Gracias por que existen amistades que son un tesoro, un regalo del cielo, y eso eres tú para mí.

JULIANA ÁLVAREZ CHIAPPE

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sin duda alguna a mis padres que siempre han hecho todo por darme lo mejor y con su amor, esfuerzo, dedicación, sus consejos y apoyo incondicional han logrado construir en mí la persona que soy hoy en día. A mi hermano, quien es mi motivación para ser un buen ejemplo, un gran estudiante y buscar ser siempre mejor. A toda mi familia y personas cercanas e incondicionales en mi vida, por hacer parte de ella, por su apoyo y por impulsarme a tomar las mejores decisiones por las cuales estoy aquí. A mi compañera de trabajo Juliana Álvarez por su dedicación, esfuerzo y apoyo a lo largo de la construcción de este proyecto de grado. Muchas gracias.

A nuestro director de proyecto de grado Luis David Gómez, por orientarnos y acompañarnos en este proyecto y en este nuevo paso en nuestra vida, su sabiduría y guía han sido primordiales para poder redactar este documento de forma correcta entregando su tiempo y su esfuerzo a nosotros, demostrando la gran persona que es y destacando su excelencia como docente.

A los mejores profesores que pude ver en toda mi carrera como estudiante de la universidad, el profesor Yuver Beltrán, Claudio Moreno y Diana Morales, excelentes docentes con grandes conocimientos y con las capacidades de transmitirlos de manera acertada y correcta, son y serán siempre ejemplos a seguir en mi vida.

LUIS FERNANDO CELIS ANDRADE

TABLA DE CONTENIDO

	pág
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	13
1. FUNDAMENTOS TEORICOS	14
1.1 Plástico oxo-biodegradable	14
1.2 Oxidación	15
1.3 Biodegradación	16
1.3.1 Biodegradación aeróbica	18
1.3.2 Biodegradación anaeróbica	18
1.4 Mecanismo de biodegradación en plásticos	18
1.5 Instituciones internacionales que supervisan la biodegradación	18
1.6 Normativa colombiana	22
1.6.1 Resolución 683 (2012)	22
1.6.2 Resolución 1407 (2018)	23
1.6.3 Decreto 2198 (2017)	25
1.7 Normativa Internacional	26
1.7.1 ISO 17556	26
1.8 Normas ASTM enfocadas en pruebas de testeo para PEBD oxo-biodegradable	26
1.8.1 ASTM D6954-18 Guía estándar para exponer y probar plásticos que se degradan en el ambiente por combinación de oxidación y biodegradación	26
1.8.2 Práctica estándar para exposición fluorescente ultravioleta (UV) de plásticos fotodegradables ASTM D5208	27
1.8.3 ASTM D4329-13 Práctica estándar para aparato de lámpara fluorescente ultravioleta (UV) Exposición de plásticos	27
1.8.4 ASTM D618-13 Prueba estándar para Acondicionamiento de plásticos	29

1.8.5	ASTM G141-09 Guía estándar para abordar la variabilidad en las pruebas de exposición de materiales no metálicos	30
1.8.6	Práctica estándar para exposición de plásticos fotodegradables en un aparato de arco de xenón ASTM D5071-06	31
1.8.7	ASTM D2565-16 Prueba estándar para exposición de plásticos al arco de xenón para aplicaciones en exteriores	31
1.8.8	Método para determinar la biodegradación aeróbica en suelos por medio de la técnica ASTM D5988-18	32
1.8.9	ASTM D425-17 Prueba estándar para determinar humedad centrifuga equivalente en suelos	33
1.8.10	ASTM D1293-18 Prueba estándar para determinar pH en agua por electrometría	33
1.8.11	ASTM D2974-20 Prueba estándar para determinar contenido de agua, materia orgánica, cenizas, y arcilla en suelos	33
1.8.12	ASTM D4129-20 Prueba estándar para determinar carbono orgánico por oxidación a altas temperaturas y por detección coulometrica	34
1.8.13	Método para determinar biodegradación aeróbica bajo condiciones controladas de compostaje ASTM D5338-15	34
1.8.14	ASTM D3590-17 Prueba estándar para determinar nitrógeno en agua por medio del método Kjeldahl	34
1.8.15	APHA 2540-17 Prueba estándar para determinar solidos totales suspendidos en agua.	35
1.8.16	Método para determinar biodegradación anaeróbica bajo condiciones de vertedero ASTM D5526-18	35
1.8.17	ASTM E260-19 Práctica estándar para cromatografía de gases en columna empacada	35
1.8.18	ASTM D2908-17 Practica estándar para medir compuestos orgánicos volátiles en agua por medio de cromatografía de gas con inyección acuosa	35

1.8.19	Especificación estándar para etiquetado de plásticos diseñados para compostaje aeróbico en instalaciones municipales o industriales ASTM D6400-19	36
1.8.20	ASTM D5338-15 Prueba estándar para determinación de la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en condiciones controladas de compostaje, incorporando temperaturas termofílicas	37
1.8.21	Método de prueba estándar para Determinación de la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en el suelo, enfocada a biorremediación ASTM D5988-18	37
1.8.22	Prueba estándar para el equivalente de humedad de centrífuga de suelos	43
2.	REVISIÓN DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES QUE APLICA COLOMBIA PARA EL USO DEL PEBD OXO-BIODEGRADABLE	39
2.1	Normas Nacionales	39
2.2	Normas Internacionales	42
3.	ANÁLISIS DE PRUEBAS DE TESTEO QUE MIDEN EL GRADO DE BIODEGRADACIÓN DE LOS PLÁSTICOS OXO-BIODEGRADABLES	43
3.1.1	Paso uno	45
3.1.2	Paso dos	48
3.1.3	Paso tres	56
4.	PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS PARA LA OXO-BIODEGRADACIÓN	59
4.1	Análisis económico	71
5.	CONCLUSIONES	74
	BIBLIOGRAFIA	75

LISTA DE FIGURAS

	pág
Ilustración 1. Reaccion oxidativa	169
Ilustración 2. Tipos de biodegradación	17
Ilustración 3. Normas como herramientas de comunicación	214
Ilustración 4. Estándares que supervisan plásticos biodegradables	47
Ilustración 5. Operaciones unitarias principales	63
Ilustración 6. Diagrama de bloques del proceso	67
Ilustración 7. Diagrama de flujo del proceso	68

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Institutos de normalización	20
Tabla 2. Metas de aprovechamiento de residuos de envases y empaques en porcentaje	27
Tabla 3. Fórmula para el cálculo de la meta de aprovechamiento de residuos	27
Tabla 4. Desviación máxima	49
Tabla 5. Descripción de equipos	69
Tabla 6. Especificación y costo de equipos	70
Tabla 7. Balance de masa	73

RESUMEN

El presente trabajo de grado se desarrolló con objetivo principal de examinar los estándares internacionales ASTM que justifican la biodegradación de plásticos oxo-biodegradables, de esta manera revisar teóricamente si las bolsas de plásticos de polietileno de baja densidad PEBD Oxo-Biodegradable cumplen con los resultados proporcionados por sus fabricantes, los cuales especifican que este no genera microplástico una vez desechado, disminuyendo así su acumulación en ecosistemas terrestres y acuáticos.

Por ende, se realizó la respectiva búsqueda de información bibliográfica para evaluar las normas nacionales e internacionales que rigen en Colombia para la producción de plásticos oxo-biodegradables. Posteriormente se analizaron las pruebas de testeo que miden el grado de biodegradación de los plásticos oxo-biodegradables establecidas por las normas internacionales ASTM, donde se evidencio la oportunidad de plantear operaciones unitarias para llevar cabo el proceso oxo-biodegradación satisfactoriamente, en donde se encontró la importancia de llevar a cabo dos procesos fundamentales para la descomposición de los plásticos oxo-biodegradables, los cuales corresponden a ser el proceso fotocatalisis seguido de una biodegradación, haciendo uso de un fotorreactor y un biorreactor respectivamente, de esta manera finalmente garantizar la obtención final de compostaje, el cual es utilizado como fertilizante gracias a sus propiedades.

Palabras claves: Biodegradación, plástico oxo-biodegradable, microplástico, fotocatalisis, compostaje, biorreactor, vertedero, fotorreactor.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realizó junto con el semillero de investigación “Degradación de polímeros plásticos contaminantes “de la Universidad Javeriana situado en la ciudad de Bogotá, para revisar teóricamente si las bolsas de plásticos de polietileno de baja densidad PEBD Oxo-Biodegradable, cumplen con los resultados proporcionados por sus fabricantes, donde la degradación se realiza en su totalidad produciendo dióxido de carbono, agua, y biomasa, lo cual permite definir si es justificable la producción e implementación de ese tipo de bolsas, haciendo uso de bases de datos que facilitaron la búsqueda de información.

Por ende, el objetivo principal del presente trabajo está basado en examinar los estándares internacionales ASTM que supervisan la biodegradación de plásticos oxo-biodegradables. Puesto que debido a las propiedades del material que lo componen, junto con la adición de aditivos capaces de otorgarles la capacidad de biodegradarse luego de su uso, ha ocasionado un incremento en su producción en los últimos años, ganando popularidad en el mercado al ser considerado un material que posteriormente de su uso, no será causa de contaminación en ecosistemas terrestres y acuáticos, debido a su acumulación.

Sin embargo, se considera necesario evaluar normas nacionales e internacionales que rigen la producción de plásticos oxo-biodegradables, con el fin de determinar si efectivamente las normas establecidas cumplen con los estándares establecidos en su totalidad, o si por el contrario que sanciones son otorgadas en caso de ser incumplidas.

Adicionalmente se busca analizar pruebas de testeo que miden el grado de biodegradación de los plásticos oxo-biodegradables, utilizadas en los estándares internacionales ASTM, las cuales definen los residuos obtenidos después de un proceso de biodegradación, designando el grado de impacto ecológico. No obstante, estas pruebas de testeo son realizadas simulando condiciones de temperatura y humedad óptimas para que el material. De manera que no garantiza los mismos resultados para escenarios reales.

Finalmente, a causa de la problemática ambiental evidenciada hoy en día se plantean operaciones unitarias para la oxo-biodegradación, que complementen el proceso de biodegradación, evitando la acumulación de micro plástico en ecosistemas terrestres y marítimos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Examinar los estándares internacionales ASTM que justifican la biodegradación de plásticos oxo-biodegradables.

Objetivos específicos

- Evaluar normas nacionales e internacionales que rigen en Colombia para la producción de plásticos oxo-biodegradables.
- Analizar pruebas de testeo que miden el grado de biodegradación de los plásticos oxo-biodegradables.
- Plantear operaciones unitarias para la oxo-biodegradación.

1. FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 Plástico oxo-biodegradable

Los plásticos oxo-biodegradable, son polímeros principalmente de polietileno de baja (PEBD) y alta densidad (PEAD) a los cuales, en su proceso de fabricación, se le añaden aditivos prooxidantes a base de cobalto, manganeso, entre otros componentes, que inducen la fragmentación parcial del material, puesto que la cantidad de carbono generado puede atribuirse al grado de aditivo prooxidante, para que pueda darse posteriormente el proceso de biodegradación [1]. El mecanismo de acción de estos aditivos prooxidantes añadidos es iniciar la rotura de los enlaces del polímero [2], posteriormente estos inducen las reacciones de fragmentación, facilitando el deterioro del material plástico oxo-biodegradable por parte de los microorganismos en el medio ambiente [2], para asegurar que por último ocurra la biodegradación, garantizando que no se generan microplástico como residuo final [3], ya que estos son piezas de plástico de bajo peso molecular, fácilmente acumulables en el ecosistema debido a su tamaño imperceptible visualmente, y que pueden ocasionar un aumento en la contaminación en ambientes acuáticos y terrestres afectando a los organismos que habitan en este ecosistema, razón por la cual debe ser controlado su presencia en el medio ambiente [4].

Como resultado se producen bolsas oxo-biodegradables de polietileno comúnmente utilizadas para uso doméstico, especialmente en el almacenamiento de alimentos para su conservación, los cuales tienen la capacidad de degradarse por la presencia del aditivo d2w o TDPA (aditivos plásticos totalmente degradables), por medio de 2 etapas; en la primera ocurre la modificación de plástico debido a la oxidación del material, al ser expuesto a luz UV, ya que los aditivos prooxidantes inducen la reacciones de fragmentación parcial del plástico al ser expuesto a este tipo de radiación [2]. La segunda etapa consta de la participación de microorganismos en cargados de la biodegradación de este, para que, al finalizar estas dos etapas, donde se lleva a cabo el proceso de descomposición respectivo, se obtenga como resultado dióxido de carbono, agua y biomasa, sin embargo, existe la posibilidad de presentar microplástico como parte del resultado final cuando el proceso de biodegradación no se realiza correctamente. Por tal razón es necesario verificar si son biodegradables y determinar el grado de biodegradación, ya que si bien el objetivo de los plásticos oxo-biodegradables es no generar residuos tóxicos, aun no se ha comprobado que esto ocurra en su totalidad [5].

1.2 Oxidación

Todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la oxidación [6], en este caso particular la oxidación se dará directamente a los componentes orgánicos que el plástico posea; cabe resaltar, el tipo de oxidación más común que se da para los polímeros es la oxidación directa, la cual comienza cuando las reacciones se dan a condiciones sencillas, esto quiere decir que ocurren de manera espontánea a temperatura ambiente o muy cercana a ella [7].

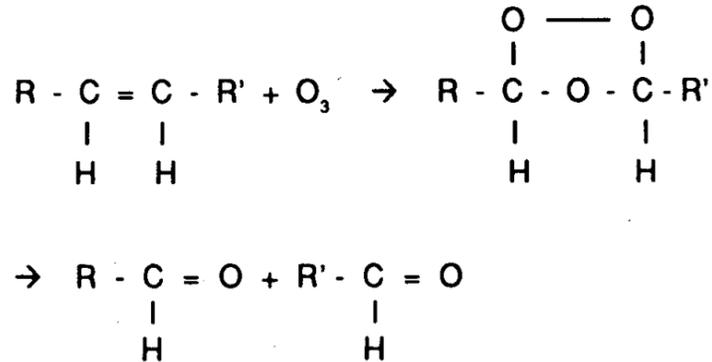
En el ambiente son muy importantes las reacciones de oxígeno molecular, ya que los polímeros tienden a ser estables a nivel ambiental, aunque la oxidación directa sea la común en ellos, muchas veces la tasa de producción de radicales es muy pequeña. Por esto, para favorecer el aumento de los radicales y acelerar la oxidación se deben utilizar mecanismos capaces de iniciar dicha producción [7], estos mecanismos son:

- Luz ultravioleta UV
- Radiación gama
- Tensiones mecánicas
- Acción de la electricidad

Por ende, la oxidación en los plásticos tiene un periodo de incubación o inicio oxidativo, este periodo es el más clave para la reacción subsecuente debido a que aquí es donde empieza una oxidación auto catalítica en donde el material lentamente se vuelve más reactivo y adquiere mayor velocidad oxidativa; como ejemplo puede darse esta reacción [7]:

Figura 1.

Reacción Oxidativa



Nota. Reacción de incubación que da paso a la reacción oxidativa autocatalítica. Tomado de:

Transesterificación de aceites vegetales, volumen 12

No.2, Pág 7;

<http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a10.pdf>

f

Donde R y R' representan porciones de la cadena del polímero y así podemos introducir varios grupos que contengan oxígeno a lo largo de la cadena o en sus extremos; de igual forma, pueden formar también algunos productos de bajo peso molecular [7].

En este orden de ideas, se encuentra que la oxidación causa el deterioro de las propiedades físicas, pues al comparar muestras antes y después del proceso oxidativo, se encuentra una disminución en el peso molecular y una clara decoloración del plástico. Esto demuestra que la oxidación juega un papel importante en la disminución de la resistencia mecánica y la capacidad de aislamiento de los plásticos [7].

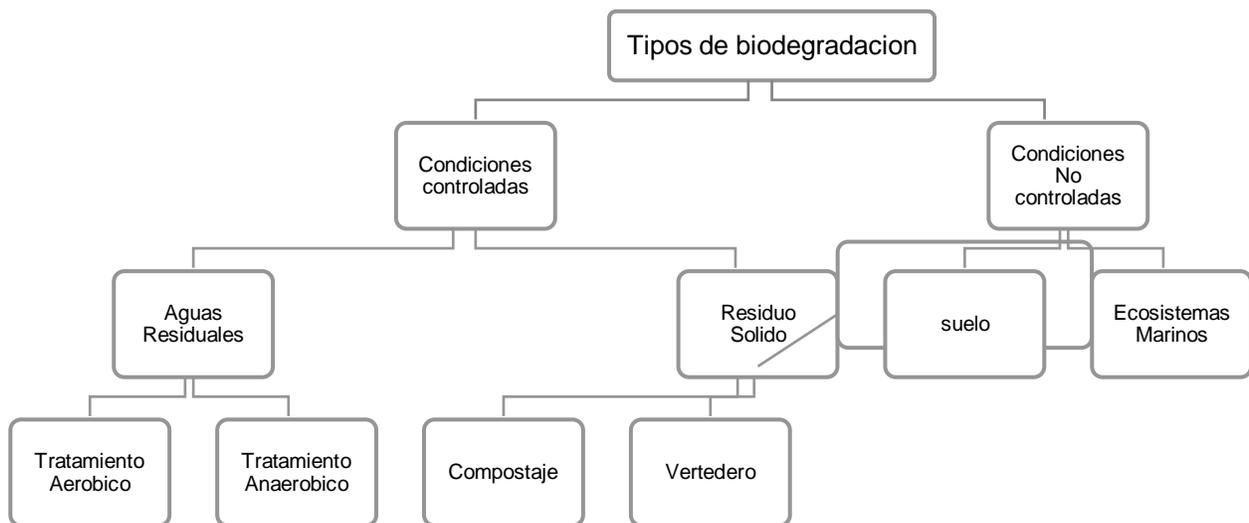
1.3 Biodegradación

El proceso de biodegradación para un material plástico biodegradable u oxo-biodegradable compuesto principalmente por carbono, hidrogeno y oxígeno, finaliza cuando se generan sales, dióxido de carbono o metano y no se obtienen residuos de microplástico, este puede realizarse aeróbica y anaeróbicamente [8].

Sin embargo, cabe resaltar que el plástico biodegradable debe ser fragmentado previamente, ya sea por medio de un pretratamiento o el deterioro natural, de esta manera garantizar que la cadena principal del polímero se descompone en cadenas de monómeros de menor peso molecular por parte de los microorganismos y su metabolismo. En la ilustración 2 se presentan los diferentes tipos de biodegradación que existen, para plásticos biodegradables u oxo-biodegradables.

Figura 2.

Tipos de biodegradación

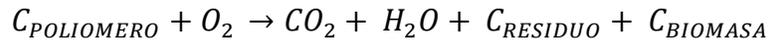


Nota. Diferentes condiciones ambientales donde ocurre la biodegradación. Tomado de: Handbook of biodegradable polymers, año 2014, editorial Smithers Rapra, Bastioli. <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2121/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=919258&lang=es&site=ehost-live&scope=site>

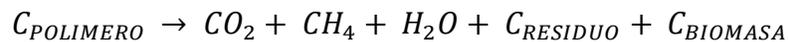
No obstante, cuando el proceso de biodegradación se realiza a condiciones ambientales, es decir a condiciones de temperatura y otras variables no controladas, como lo menciona la imagen anterior, el tiempo necesario para que este finalice totalmente, podría ser de años, por esta razón, para ensayos e experimentos donde se busca determinar el porcentaje de biodegradación a condiciones controladas de menor duración es válido considerar que el porcentaje no corresponderá a ser del 100% por lo cual es posible obtener residuos como biomasa, minerales y en menor porcentaje residuos provenientes de la cadena de carbono proveniente del plástico [9]. A continuación, se

presentan las reacciones que experimenta un plástico biodegradable en un proceso de biodegradación aeróbica y anaeróbica [5].

1.3.1 Biodegradación aeróbica:



1.3.2 Biodegradación anaeróbica:



1.4 Mecanismo de biodegradación en plásticos

La biodegradación de los plásticos ocurre gracias a la presencia de microorganismos como bacterias, levaduras u hongos, específicamente debido a la acción de sus enzimas presentes en su metabolismo [8]. En este proceso ocurre primero la despolimerización, donde las enzimas extracelulares fraccionan la cadena del polímero principal, haciendo escisiones de manera aleatoria o secuencial en la cadena, con el fin de obtener oligómeros y monómeros para que seguidamente sea llevado a cabo la mineralización donde el polímero es convertido en dióxido de carbono o metano, agua y biomasa [10]. Es importante recalcar que las enzimas encargadas de realizar todos estos procesos son las responsables de inducir la velocidad de reacción química, al actuar como catalizadores biológicos, por tal razón es necesario establecer condiciones óptimas de temperatura, pH, presencia de oxígeno y agua al microorganismo, para garantizar la biodegradación [5]. Una de las técnicas en la biodegradación es el compostaje, la cual consiste en la descomposición aeróbica de materia orgánica biodegradable principalmente residuos domésticos o agroindustriales. Este es uno de los procesos más utilizados para verificar grado de biodegradación de los plásticos oxo-biodegradable [9]. Este proceso se lleva a cabo en cuatro fases: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración. En las dos primeras se da la degradación intensiva, donde ocurre la mayor parte de actividad microbiana, luego la fase de curado, donde la actividad microbiana desciende y por último se da la fase de maduración [5].

1.5 Instituciones internacionales que supervisan la biodegradación

En 1992 se realizó un taller internacional sobre biodegradabilidad, donde se reunieron expertos en áreas ambientales, fabricantes de productos, laboratorios de pruebas, y organizaciones de normalización de Europa, Estados Unidos y Japón, con el objetivo de definir los diferentes términos

relacionados con el tema biodegradación y degradación, establecer estándares de calidad y metodologías de prueba que justificaran dichos estándares. Como resultado se consideraron los siguientes puntos clave para definir un material biodegradable [5]:

- El método de eliminación donde ocurre el proceso de biodegradación podrá ser en escenarios específicos como tratamiento de lodos, compostaje o tratamiento de aguas residuales
- La tasa de degradación deberá ser constante según el método de eliminación, controlando su acumulación
- Los productos resultantes después de un proceso de biodegradación aeróbica deberán corresponder a dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O), metano (CH_4), minerales, productos intermedios utilizados en la fabricación, y biomasa
- Deben biodegradarse de manera segura, el producto final resultante no deberá ser peligroso o reactivo.

Como resultado el Comité Europeo de Normalización, la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Sociedad Estadounidense de Ensayos y Materiales (ASTM) establecieron los estándares internacionales que garantizan que el plástico biodegradable y el plástico oxo-biodegradable cumple con los requisitos de calidad para su fabricación, así mismo estos estándares son renovados y actualizados constantemente. Razón por la cual actualmente la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por medio de la norma ASTM-D8333 (Terminología estándar relacionada con los plásticos), define plástico biodegradable como: plástico degradable en el cual la degradación ocurre por efecto de la acción de microorganismos. De igual manera define plástico degradable como el plástico diseñado para sufrir cambios significativos en su estructura química bajo ciertas condiciones ambientales, dando como resultado la pérdida de sus propiedades [5].

Actualmente existen las siguientes organizaciones encargadas de establecer las normas, siendo la sociedad estadounidense de pruebas y materiales (ASTM) una de las pioneras en establecer estándares de calidad para los plásticos biodegradables desde el año 1992; luego está el Comité Europeo de Normalización (CEN) y el Instituto Alemán de Normalización (DIN), quienes desarrollaron métodos de prueba que fomentaron el cumplimiento de las normas debido a la gran variedad de especificaciones y parámetros necesarios que deben tenerse en cuenta. Como resultado se desarrollaron a nivel mundial normas internacionales para los plásticos biodegradables y oxo-biodegradables por parte la Organización Internacional de Normalización (ISO), para garantizar la

seguridad ambiental, en la siguiente tabla se nombran las principales organizaciones activas encargas del cumplimiento de los estándares de calidad [5].

Tabla 1.

Institutos de normalización

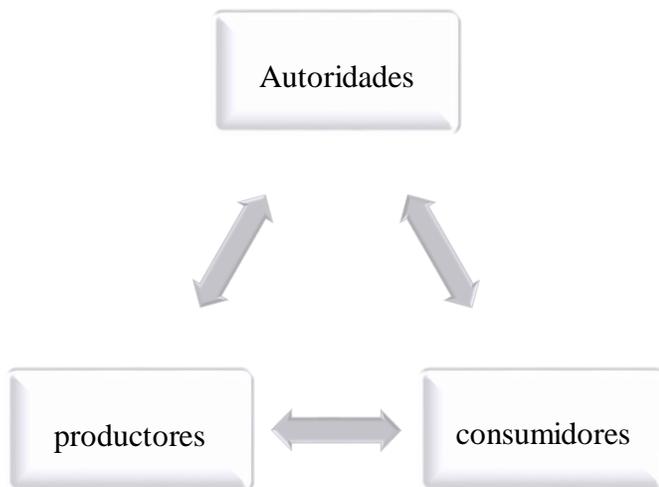
Abreviación	Nombre	Ubicación geográfica
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales	USA-Canadá
CEN	Comité Europeo de Normalización	EU- EFTA
CS	Estándares chinos	China
DIN	Instituto Alemán de Normalización	Alemania
ISO	Organización Internacional de Normalización	Mundial
JIS	Comité de Normas Industriales de Japón	Japón
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos	Países Miembros
AS	Estándares Australianos	Australia y Nueva Zelanda

Nota. Principales institutos encargados de supervisar los diferentes estándares de calidad. Tomado de: Handbook of biodegradable polymers, año 2014, editorial Smithers Rapra, Bastioli. <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2121/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=919258&lang=es&site=ehost-live&scope=site>

Así mismo, fueron establecidos procedimientos y pruebas para verificar el porcentaje de biodegradación de los plásticos biodegradables y oxo-biodegradables, lo cual dio origen a un extenso número de estándares internacionales tanto para normas, como para métodos y pruebas de testeo, especificando las condiciones ambientales en los cuales deben ser realizados. Adicionalmente cada norma o método es referenciado bajo otro estándar de calidad, donde se evidencia la relación entre los mismos, todo esto con el objetivo de cumplir con los estándares de calidad establecidos, y de esta manera, controlar su producción. Es por eso que hoy en día es posible mantener informado tanto a los fabricantes de productos, como a los diferentes consumidores, sobre las normas que rigen la elaboración de estos productos y los estándares de calidad que estos deben cumplir, siendo supervisados por entidades internacionales [5], como lo indica la siguiente figura.

Figura 3.

Normas como herramienta de comunicación



Nota. La figura representa la relación entre autoridades, y consumidores en base a las normas. Tomado de: Handbook of biodegradable polymers, año 2014, editorial Smithers Rapra, Bastioli. <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2121/login.aspx?direct=true&db=e00xww&AN=919258&lang=es&site=ehost-live&scope=site>

1.6 Normativa colombiana

En Colombia actualmente no se aplican normas ASTM o ISO con respecto a la producción y distribución ya sea de PEBD tradicional o PEBD oxo-biodegradable, por el contrario, en el país se manejan algunos tipos de plásticos tales como oxo-biodegradables, biodegradables y compostables, de los cuales no existen normas nacionales que los respalden; por esto, para una revisión adecuada de las normativas de producción y distribución de PEBD en el país se deberán tomar en cuenta los proyectos de ley y las normas nacionales vigentes las cuales expliquen el manejo que se les da a los plásticos en Colombia legalmente.

1.6.1 Resolución 683 (2012)

Este decreto trata sobre los envases y equipamientos que entren en contacto directo con alimentos; para este caso se profundiza en el PEBD.

1.6.1.a Artículo #3. El artículo se centra en los envases terciarios ya que estos transportan en grandes cantidades a los 2 anteriores (bolsas); esto teniendo en cuenta que los primarios y secundarios son aquellos que están en contacto directo con bebidas, en su mayoría estos envases están hechos de tereftalato de polietileno PET. La norma indica que las bolsas plásticas que se utilicen y expendan no deben superar los 300 micrones, sabiendo que 1 película plástica tiene 250micrones de grosor en promedio [11].

1.6.1.b Artículo #4. Clasifica en grupos los materiales utilizados para la producción de envases y equipamientos; por esto en el nivel 1 estipulado en el artículo, se encuentran los materiales plásticos con sus aditivos incluidos el PEBD tradicional [11].

1.6.1.c Artículo #7. Aquí se evidencia el manejo que se le da en Colombia a los materiales reciclados y reutilizados; en donde se debe cumplir con los siguientes requisitos.

- La reutilización de envases de vidrio o plástico se permitirá únicamente si se cuenta con tecnologías de retorno de envases, que incluyan la logística de recuperación de estos, la detección de contaminantes presentes, su limpieza e higienización, así como la evaluación de su aptitud sanitaria e inocuidad [11].

- Los materiales reciclados que sirvan para fabricar envases, equipamientos u objetos mono o multicapa, deben ser sometidos previamente a un proceso de descontaminación o ultra limpieza, el material recuperado debe ser de grado alimentario [11].

1.6.2 Resolución 1407 (2018)

En esta resolución se encuentra la reglamentación ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio y metal [12].

1.6.2.a Artículo #1. Este artículo establece a los productores la obligación de formular, implementar y mantener actualizado un Plan de Gestión Ambiental de residuos de envases y empaques, que fomente el aprovechamiento [12].

A partir del 26 de julio del año 2018, el Ministerio de Ambiente da un gran salto con respecto al reciclaje de todos los envases utilizados mencionados anteriormente, forzando a los productores a diseñar un plan de gestión ambiental enfocado a la recuperación de estos, esto con el fin de reducir el impacto ambiental; aunque aún no se ven o denotan incentivos por este tipo de gestión, si se les obliga de manera legal a cumplirlo a excepción de algunos casos tales como:

- Aquellos envases y empaques que correspondan a residuos peligrosos, según lo establecido en la normatividad vigente [12].
- Residuos de envases y empaques de madera y fibras textiles o naturales, distintas a papel y cartón [12].
- Empaques y envases primarios de fármacos y medicamentos [12].

1.6.2.b Artículo #4. Todos los productores en el territorio nacional deberán formular y presentar, implementar y mantener actualizado ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA; un plan individual o colectivo de gestión ambiental de residuos de envases y empaques [12].

1.6.2.c Artículo #9. En este artículo se encuentran las metas que los productores deberán alcanzar frente al aprovechamiento de residuos de envases y empaques; para esto se plantean 2 tablas en donde para la primera se dispone de una meta principal de aprovechamiento de residuos y en la segunda los cálculos y variables utilizadas.

Tabla 2.

Metas de aprovechamiento de residuos de envases y empaques en porcentaje.

Periodo de Evaluación año	Incremento anual (%)	Meta de aprovechamiento de residuos (%)
2021	10%	10%
2022	2%	12%
2023	2%	14%
2024	2%	16%
2025	2%	18%
2026	2%	20%
2027	2%	22%
2028	2%	24%
2029	2%	27%
2030	3%	30%

Nota. En la tabla se muestra la meta del aprovechamiento de residuos en porcentaje con respecto al año. Tomado de Resolución 1407 de 2018, República De Colombia; <http://www.andi.com.co/Uploads/RES%201407%20DE%202018.pdf>.

Tabla 3.

Fórmula para el cálculo de la meta de aprovechamiento de residuos de envases y empaques.

Nombre de la meta	Metodología del cálculo
La meta de aprovechamiento de residuos de envases y empaques de la Tabla 2.	Donde: $\%AREE = \frac{QMA}{QMPM}$
Nombre de la meta	Metodología del cálculo
Se calcula como el porcentaje alcanzado de aprovechamiento de residuos de envases y empaques (%AREE)	$\%AREE =$ Porcentaje de aprovechamiento de residuos de envases y empaques.

	<p>QMA= Peso total de residuo aprovechado en el año de evaluación, en toneladas.</p> <p>QMPM= Peso total de envases y empaques puesto en el mercado en el año base, en toneladas.</p>
--	---

Nota. En la tabla se muestra la ecuación utilizada para el cálculo del porcentaje de aprovechamiento aclarando es exclusivo para envases y empaques, también se anexa el significado de las diferentes variables. Tomado de Resolución 1407 de 2018, República De Colombia; <http://www.andi.com.co/Uploads/RES%201407%20DE%202018.pdf>.

1.6.3 Decreto 2198 (2017)

En este decreto se modifica el epígrafe de la Parte 5 del Libro 1 y se adiciona el Título 6 a la Parte 5 del Libro 1 [13].

Aquí se anexa la nueva reglamentación a las bolsas plásticas en donde se les adiciona un impuesto de uso el cual comenzó siendo de 20\$ y se acordó aumentar 10\$ anualmente.

1.6.3.a Artículo 2 -Título 6 – Cap.1. En este capítulo se reglamentan los requisitos para aplicar las tarifas diferenciales a las bolsas plásticas aclarando que aquellas bolsas que ofrezcan soluciones ambientales quedarán exentas del costo total adicional dando tarifas diferenciales.

2.6.3.a Artículo 2 -Título 6 – Cap.2. Aquí se especifican los porcentajes de las tarifas diferenciales de la siguiente forma: De acuerdo con lo dispuesto en el parágrafo 1 del artículo 512-15 del Estatuto Tributario, las bolsas plásticas que ofrezcan soluciones ambientales tendrán tarifas diferenciales del 0%, 25%, 50% o 75% del valor pleno de la tarifa [13]. Estos porcentajes con respecto al valor pleno de la tarifa aplicarán al cumplir los siguientes requisitos:

- **Biodegradabilidad:**

Bolsa plástica biodegradable en un porcentaje igual o superior al treinta por ciento (30%) según lo indicado en las normas NTC-5991-2014, ASTM D6400-04, UNE-EN-ISO 13432:2000-11, DIN V54900-2 [13].

1.7 Normativa Internacional

1.7.1 ISO 17556

En esta norma se determina la biodegradabilidad aeróbica máxima de materiales aeróbicos en el suelo midiendo la cantidad de dióxido de carbono desprendido del proceso; una de las variables que esta norma maneja es la humedad presente en el suelo, la cual se modifica paulatinamente para analizar el efecto que esta tiene frente a la biodegradación; de igual forma, se aclara que si se utiliza suelo no adaptado o pre tratado, se simulara el proceso de biodegradación casi en un ambiente natural; de lo contrario, si se utiliza un suelo pre expuesto o pre tratado como se menciona anteriormente, se utilizará para investigar el potencial biodegradable de un material de prueba [14]. Cabe aclarar, que el material plástico es la única fuente de carbono y energía que se mezcla con el suelo. La mezcla se dejará reposar durante un período de tiempo durante el cual se observa la cantidad de oxígeno consumida (DBO) mediante un respirómetro o se determina la cantidad de dióxido de carbono desprendido. Siempre que se absorba el CO₂ desprendido, la DBO se puede determinar midiendo la cantidad de oxígeno necesaria para mantener un volumen de gas constante en el respirómetro, o por otro lado midiendo automática o manualmente el cambio de volumen o presión (o una combinación de los dos) [14].

El nivel de biodegradación, expresado como porcentaje, se determina comparando la DBO con la demanda teórica de oxígeno (ThOD) o comparando la cantidad de dióxido de carbono desprendido con la cantidad teórica (ThCO₂). El período de prueba normal en el que se hace la evaluación es de seis meses y no debe ser superior a 1 año, esto queriendo alcanzar el mayor porcentaje de degradación posible [14].

1.8 Normas ASTM enfocadas en pruebas de testeo para PEBD oxo-biodegradable

1.8.1 ASTM D6954-18 Guía estándar para exponer y probar plásticos que se degradan en el ambiente por combinación de oxidación y biodegradación

El estándar internacional principal que respalda los estándares de calidad para plásticos biodegradables busca determinar el grado y la velocidad de degradación de este. Esto lo realiza por medio de tres pasos realizados consecutivamente [15].

El primero evalúa y calcula la pérdida de propiedades físicas del plástico, luego de que el material es sometido a un proceso de fotodegradación, para el cual se tienen en cuenta los rangos de humedad de la materia sometida al proceso, y así establecer a que rango de temperatura debe ser

expuesto el material. Esto con el fin de simular las condiciones ambientales reales en que se supone el plástico debería ser degradado [15].

Eventualmente los residuos obtenidos de la práctica anterior pasan a ser evaluados con el fin de medir el grado de descomposición una vez finaliza el proceso de fotodegradación al que fueron sometidos. Seguidamente el material resultante es expuesto a diferentes métodos de prueba, considerando las diferentes condiciones en que se presenta la biodegradación tanto aeróbica o anaeróbica. Por último, los resultados obtenidos son sometidos a pruebas que designan el impacto ecológico a causa del material plástico biodegradable [15].

1.8.2 Práctica estándar para exposición fluorescente ultravioleta (UV) de plásticos fotodegradables ASTM D5208

En esta práctica se analiza el plástico fotodegradable, de cumplir la característica de fotodegradación el plástico deberá degradarse rápidamente debido a que se fuerza el material a una condición de estrés la cuál es presentado en el ambiente natural en el cual podría llegar a terminar; recalando que la luz ultravioleta trata de asemejar la exposición del plástico a la luz solar y de esta manera se logra estudiar el comportamiento del plástico frente a esta característica [16].

Cabe resaltar, que la exposición utilizada en esta práctica no pretende simular el deterioro causado por fenómenos meteorológicos localizados como la contaminación atmosférica, el ataque biológico y la exposición al agua salada [16].

En la norma se encuentran actualmente varios puntos clave, ya sea la temperatura necesaria la cual se encuentra entre 18°C y 27°C o por otro lado la cantidad de réplicas que deben realizarle a la prueba, las cuales por sugerencia de la literatura serán tres [16].

Por otro lado, para las propiedades tensiles se tiene a disposición la norma ASTM D882-18 la cual define que las láminas de plástico no pueden presentar un grosor mayor a 1mm y que es un método de prueba actualizada, rápido y exclusivo para láminas de plástico específicamente [17].

1.8.3 ASTM D4329-13 Práctica estándar para aparato de lámpara fluorescente ultravioleta (UV) Exposición de plásticos

Esta práctica pretende cumplir dos objetivos en general, de modo que sea una guía para la norma ASTM D5208; el primer objetivo consiste en establecer el procedimiento específico que debe llevarse a cabo para la exposición de plásticos a los rayos UV y el segundo consta de especificar

las condiciones en que debe realizarse la prueba para llevarse a cabo correctamente; un ejemplo de esto son las distribuciones espectrales ASTM G177-03 la cual muestra una tabla diseñada específicamente para la utilización del equipos de luz ultravioleta (UV) y en que rango debe manejarse [18].

Para comenzar la lámpara que irradia la luz ultravioleta (UV) debe cumplir como requisito la norma ASTM G151, posteriormente, se procederá a llevar a cabo el experimento en 3 pasos según lo define la norma:

- Ciclo A: Irradiancia de 340nm; $0,89 \frac{W}{m^2 * Nm}$
- Ciclo B: Irradiancia de 340nm; $0,77 \frac{W}{m^2 * Nm}$
- Ciclo C: Irradiancia de 340nm; $0,83 \frac{W}{m^2 * Nm}$

Como podemos observar, aunque se maneje la misma longitud de onda varía ligeramente la irradiancia utilizada; además de esto todos los 3 ciclos o las 3 pruebas son expuestas a 8 horas [18].

1.8.3.a ASTM D5870-16 Prueba estándar para el cálculo del índice de retención de propiedades de los plásticos. Esta prueba cubre los procedimientos para el cálculo de un índice de retención de propiedad (PRI) de plásticos termoplásticos después de exposición a envejecimiento térmico, acelerado natural o artificial o exposiciones químicas [19]. Esta norma resalta que el método para calcular el PRI del plástico posee 2 variantes, las cuales son: en si la prueba es destructiva o no destructiva; para explicar un poco mejor lo mencionado, se basa en cuál es el estado del plástico, si este logro deteriorarse por completo o si por el contrario se expuso a la luz ultravioleta (UV) en un tiempo no muy prolongado [19].

- Destructiva: Los resultados obtenidos del índice de retención deben compararse con resultados posteriores evaluados de plásticos expuestos a la intemperie o al ambiente debido a que se supone el plástico se degrada casi en su totalidad [19].
- No destructiva: En este caso se debe comparar el plástico después de la prueba y antes de esta (prístino), esto con el fin de ver la velocidad de degradación que se obtuvo, el tiempo que se usó y los ensayos pertinentes [19].

1.8.3.b ASTM G151-19 Prueba de exposición de materiales no metálicos en dispositivos de prueba acelerados que utilizan fuentes de luz de laboratorio. Esta prueba cubre los procedimientos generales para el uso de materiales no metálicos al utilizar fuentes de luz artificiales en laboratorio, en este caso la luz ultravioleta (UV) [20]. Esta prueba proporcionará información sobre el uso e interpretación de datos de pruebas de exposición acelerada. Además de esto tiene una aclaración importante, la cual indica que no se puede especificar ninguna prueba de exposición de laboratorio como una simulación real en entorno exteriores, también; resalta que los resultados de estas pruebas son netamente representativos y dependientes de las composiciones que tenga el material plástico. Por lo tanto, los resultados de estas pruebas solo pueden ser comparativas con respecto a un entorno en particular, para este caso el laboratorio [20].

La norma ASTM basa lo dicho anteriormente basándose en 3 puntos:

- Los factores de aceleración (degradación acelerada mediante luz ultravioleta) dependen del material y pueden variar significativamente para cada material [20].
- Variabilidad en la tasa de degradación debido a las condiciones presentadas en el laboratorio [20].
- Factores de aceleración calculados en base a la relación de irradiancia en una fuente de luz de laboratorio con respecto a la radiación solar [20].

1.8.4 ASTM D618-13 Prueba estándar para Acondicionamiento de plásticos para pruebas

Aunque generalmente las propiedades físicas y químicas para los bioplásticos son las mismas; es necesario acondicionar dichas propiedades para reducir el margen de error que se pueda presentar a la hora de analizarlas a nivel de laboratorio; de igual forma, es necesario estandarizar las condiciones que se tenga a nivel ambiente tales como humedad y temperatura [21].

Existen algunas pruebas que sirven para complementar el procedimiento, tales como ASTM D5032 la cual indica la importancia de mantener la humedad relativa constante mediante soluciones acuosas; de modo que se igualen las condiciones para cada uno de los objetos de prueba, en este caso para el plástico [21] [22].

1.8.4.a ASTM D883-20a Terminología estándar relacionada con plástico. La terminología especificada en este estándar cubre definiciones de términos técnicos para las industrias, producción y distribución de plásticos; aquí se presentarán algunos de los más utilizados:

- Plásticos acetílicos: Plásticos a base de polímeros que tienen un predominio de los enlaces acetal en la cadena principal [23].
- Polimerización por adición: Polimerización en la que monómeros se unen entre sí sin que se separe el agua u otras moléculas simples [23].
- Envejecimiento: El efecto sobre los materiales de la exposición a un medio ambiente durante un intervalo de tiempo [23].

1.8.5 ASTM G141-09 Guía estándar para abordar la variabilidad en las pruebas de exposición de materiales no metálicos

La norma indica que ningún procedimiento experimental de este tipo puede ser repetible o reproducible de la misma forma al anterior, también especifica que este tipo de pruebas tienen un margen de error bastante grande, esto quiere decir que son procedimientos que tienden a tener una mala reproducibilidad por los diversos factores que se deben tener en cuenta al realizar la comparativa, cabe resaltar esta prueba de exposición será directamente con luz ultravioleta solar [24].

La variabilidad experimental se basa principalmente en la época del año y el clima que se presente en el mismo; y así mismo variables como la temperatura, la humedad presente en el ambiente, las horas de sol y el lugar exacto en donde se desea exponer el plástico al sol para poder repetir el experimento, hacen que el margen de error aumente considerablemente [24].

1.8.5.a ASTM G7-13 Prueba estándar para pruebas de exposición ambiental atmosférica de materiales no metálicos. La norma muestra y explica cómo se debe proceder para realizar de manera correcta la prueba de exposición ambiental atmosférica de materiales no metálicos, en este caso será plástico oxo-biodegradable expuesto a la intemperie [25]. En primer lugar, expresa que las pruebas deben realizarse de manera corta con respecto al tiempo si se desean hacer varias replicas para disminuir el margen de error o comparar resultados. Esto quiere decir que el tiempo entre las dos pruebas no debe ser mayor a año y medio; de igual forma, recomiendan realizar pruebas en paralelo para reducir el margen de error [25].

En segundo lugar, los sitios de prueba para las exposiciones pueden realizarse en cualquier tipo de clima sin excepción. Sin embargo, para obtener indicaciones más rápidas y precisas de la durabilidad al aire libre, las exposiciones normalmente se deben realizar en lugares que reciben altos niveles de radiación solar, temperatura y humedad; esto con el fin de maximizar las condiciones de estrés colocadas en el plástico [25].

1.8.5.b ASTM G24-13 Prueba estándar para realización de exposiciones a la luz del día filtrada a través del vidrio. Esta prueba evalúa la resistencia de materiales no metálicos frente a la luz solar, para este caso se toman los plásticos y se exponen a radiación solar la cuál será filtrada a través de una lámina de vidrio en un cuarto con ventilación pasiva y seguidamente en uno sin ventilación [26].

De igual forma, se centrarán directamente en los contaminantes que afectan el experimento; esto es debido a las variaciones que pueden dar los resultados de la degradación, ya sea acelerada por agentes patógenos y condiciones naturales o retrasada por los mismos, esto concluye en datos erróneos y resultados no válidos los cuales quieren evitarse [26].

1.8.6 Práctica estándar para exposición de plásticos fotodegradables en un aparato de arco de xenón ASTM D5071-06

En esta práctica se cubren los procedimientos específicos y necesarios que son aplicables para la exposición de arco de xenón en plásticos fotodegradables; el principio básico del arco de xenón es simular luz diurna mediante temperatura y humedad controladas, también cabe resaltar que no hay correlación con esta prueba y otras realizadas a los plásticos, un ejemplo de estas mencionadas anteriormente es mediante luz ultravioleta (UV) [27].

Así mismo en esta prueba se detallan los mismos problemas presentados con anterioridad, variación alta de resultados entre prueba y prueba, debido a cambios ya sean de las condiciones o del medio dónde se experimenta, resaltando que al ser un arco de xenón se intentará reducir el margen de error controlando temperatura y humedad [27].

1.8.7 ASTM D2565-16 Prueba estándar para exposición de plásticos al arco de xenón para aplicaciones en exteriores

La finalidad de esta práctica se da en la capacidad que posee el material plástico para resistir el deterioro de sus propiedades mecánicas y ópticas causadas por la exposición a la luz, el calor y el agua. Esta práctica está destinada a inducir cambios en las propiedades asociados con las condiciones de uso final, incluidos los efectos de la luz del día, la humedad y el calor que se pueden presentar en el desarrollo de la práctica [28].

Recordemos que en las pruebas de luz ultravioleta (UV) anteriores hay 2 tipos de pruebas, estas son la destructiva y la no destructiva. En este caso al ser una prueba más rápida se verá un aumento en el deterioro en el material plástico; por lo que se requiere enfocarse en las pruebas destructivas, esto con el fin de tener los suficientes resultados planteados y lograr hacer un comparativa del resultado final vs inicial, recordando que la parte inicial comienza con las láminas prístinas y el final es lo obtenido luego del deterioro con la luz que se genera en el arco de xenón.

1.8.7.a ASTM G155-13 Prueba estándar para operación de aparatos de luz de arco de xenón para la exposición de materiales no metálicos. Esta prueba indica los principios básicos y los procedimientos necesarios para usar luz de arco de xenón y aparatos de agua destinados a reproducir los efectos de la intemperie que se dan cuando los materiales se exponen a la luz solar (ya sea directa o a través del vidrio de una ventana, donde se encuentre el plástico en ese momento) y humedad simulando lluvia en un escenario real [29].

La fuente de luz será una o más lámparas de arco de xenón revestidas de cuarzo que emitirán una radiación desde menos de 270 nm en el espectro a través del espectro visible y en el infrarrojo, teniendo en cuenta que no se pueden comparar con otras pruebas de luz a menos que los equipos manejen la misma longitud de onda y tenga un porcentaje de degradación similar [29].

1.8.8 Método para determinar la biodegradación aeróbica en suelos por medio de la técnica ASTM D5988-18

Método para determinar biodegradación aeróbica en suelos medio de la técnica ASTM D5988-18 Como se mencionó anteriormente, se aplican diferentes practicas donde ocurre la biodegradación, a continuación, se destacan los tres métodos utilizados para determinar biodegradación de plásticos en diferentes condiciones ambientales.

La principal practica busca determinar, medir y calcular la velocidad del grado de biodegradación del plástico, simulando condiciones de un ambiente aeróbico. En donde el material residual es

expuesto junto con muestras de suelo preparadas previamente, las cuales deben ser provenientes de mínimo 3 diferentes tipos de suelo, deben ser fértiles y naturales, a las cuales se les realiza un pretratamiento para retirar residuos de plantas o material inerte a cada uno. Como consecuencia el carbono presente en el polímero es convertido a dióxido de carbono debido a la presencia de los microorganismos en el suelo. De manera que se mide el grado de generación de dióxido de carbono respecto al tiempo, para así designar el grado de biodegradación. Por otro lado, es necesario analizar el suelo utilizado en la práctica, determinar pH, humedad, presencia de nitrógeno y carbón contenido en el mismo [26]. Referenciando los siguientes estándares.

1.8.9 *ASTM D425-17 Prueba estándar para determinar humedad centrifuga equivalente en suelos.*

En esta prueba la muestra analizada es sometida a secado al aire, luego la muestra es remojada con agua destilada. Finalmente se centrifuga. Una vez finaliza el proceso se determina el contenido de humedad según el Método de prueba estándar D2216 para la determinación del contenido de agua (humedad) de suelo y roca por masa, donde la muestra de suelo es secada en hornos, se calcula el contenido de humedad según la pérdida de masa correspondiente al agua contenida [27].

1.8.10 *ASTM D1293-18 Prueba estándar para determinar pH en agua por electrometría.*

Para la determinación de pH del suelo se mezcla el suelo con agua destilada, por medio del potenciómetro, en caso de determinar pH en agua solo es necesario hacer uso de potenciómetro, especialmente para el agua proveniente del sobrenadante obtenido una vez se centrifuga el suelo [29].

1.8.11 *ASTM D2974-20 Prueba estándar para determinar contenido de agua, materia orgánica, cenizas, y arcilla en suelos.*

El método consiste en determinar el contenido de agua como primer paso, sometiendo la muestra de suelo analizada por medio de secado para su determinación. Posteriormente la muestra es sometida a combustión en hornos, para la obtención de cenizas, en caso de utilizar el suelo residual posteriormente al método, someter la muestra a aire seco [30].

1.8.12 ASTM D4129-20 Prueba estándar para determinar carbono orgánico por oxidación a altas temperaturas y por detección coulométrica.

La prueba descrita en el presente estándar está dirigida principalmente a la determinación de carbono total en agua potable, destilada, o aguas residuales proveniente de industrias. Así como también especifica la preparación de muestras en caso de examinar aguas muy contaminadas. Sin embargo, es posible realizarse la prueba en suelo para determinar el carbono orgánico generado posteriormente de la biodegradación, a pesar de que la prueba no describa el procedimiento [5].

1.8.13 Método para determinar biodegradación aeróbica bajo condiciones controladas de compostaje ASTM D5338-15

Segunda practica principal para determinar el grado de descomposición en el proceso de biodegradación, la cual hace uso de compostaje. El compostaje utilizado es recogido de residuos solido seleccionado el cual debe corresponder a un contenido de humedad entre un 50-55% y pH entre 7-8,2. De manera que el proceso se realiza en un ambiente aeróbico controlando y monitoreando temperatura, aireación y humedad constantemente. Se determina el porcentaje de biodegradación, según la conversión de carbono a dióxido de carbono respecto al tiempo. Así como también se calcula la pérdida del peso del material residual. Adicional se debe determinar solidos volátiles, humedad y concentración de nitrógeno [34].

La práctica referencia los siguientes estándares expuestos a continuación, para determinar propiedades que deben ser controladas en el proceso de biodegradación en compostaje.

1.8.14 ASTM D3590-17 Prueba estándar para determinar nitrógeno en agua por medio del método Kjeldahl.

Este método tiene como objetivo determinar el contenido de nitrógeno en agua, ya sea midiendo el amoniaco libre o el amoniaco generado a partir de los compuestos nitrogenados de origen biológico como lo son aminoácidos o proteínas, además de considerar el nitrógeno como un nutriente esencial para los organismos fotosintéticos es necesario monitorear y controlar el contenido de este en el medio ambiente [6].

1.8.15 APHA 2540-17 Prueba estándar para determinar sólidos totales suspendidos en agua.

Esta prueba tiene como objetivo determinar los sólidos totales suspendidos en agua, los cuales se refieren a toda la materia disuelta en agua, ya que un contenido alto de sólidos disueltos o con alto contenido de minerales no son adecuadas para uso industrial y menos para consumo humano por lo cual busca evaluar y controlar el contenido de efluentes en aguas residuales permitidos. De igual manera es posible determinar el contenido de sólidos totales en lodos, de modo que pueda determinarse en suelos para su respectivo análisis, después del proceso de biodegradación [8].

1.8.16 Método para determinar biodegradación anaeróbica bajo condiciones de vertedero ASTM D5526-18

Por último, la tercera practica principal para el proceso de biodegradación corresponde al método que se desarrolló para determinar el grado de biodegradación anaeróbica para residuos provenientes de desechos domésticos al cual se le realiza un pretratamiento en biodigestores siendo expuesto a bacterias metanogénicas, junto con material plástico biodegradable previamente degradado, simulando condiciones ambientales a vertederos o rellenos sanitarios. Midiendo la conversión de carbono a dióxido de carbono y metano gaseoso en función al tiempo [37].

La práctica referencia los siguientes estándares, para determinar propiedades que deben ser controladas en el proceso de biodegradación anaeróbica en condiciones ambientales de vertederos.

1.8.17 ASTM E260-19 Práctica estándar para cromatografía de gases en columna empacada.

Técnica analítica de separación física, gracias a su capacidad de separación y análisis de mezclas compuestas por componentes complejos, es una de las técnicas más utilizadas, para separar mezclas gaseosas, por lo cual expone el proceso de separación en la columna, de modo que pueda ser empleada en la determinación de los diferentes compuestos provenientes de la materia prima, después del proceso de biodegradación [7].

1.8.18 ASTM D2908-17 Practica estándar para medir compuestos orgánicos volátiles en agua por medio de cromatografía de gas con inyección acuosa

Como se mencionó en el método anterior la cromatografía es una técnica de separación física, dado que esta práctica está dirigida para determinar compuestos orgánicos volátiles en aguas residuales,

el proceso de separación constará igualmente de una columna a la cual ingresa la mezcla que será analizada en fase acuosa, de manera que el principio de separación en la columna de gas será el mismo [40]. Sin embargo, puesto que esta práctica no está dirigida para el análisis del vertedero específicamente, se propone realizarlo junto con el método ASTM D425-17 Test estándar para determinar humedad centrifuga equivalente en suelos, en donde es posible determinar compuestos volátiles en agua correspondiente al sobrenadante, al separar el suelo mediante la centrifugación [27].

1.8.19 Especificación estándar para etiquetado de plásticos diseñados para compostaje aeróbico en instalaciones municipales o industriales ASTM D6400-19

Esta especificación cubre plásticos biodegradables y productos fabricados de plásticos que están diseñados para ser compostados en condiciones aeróbicas en instalaciones de compostaje aeróbico municipales e industriales, donde se alcanzan las condiciones adecuadas o requeridas [30].

La norma indica que existen unos requisitos básicos para compostar satisfactoriamente un producto o material y son las siguientes:

- **Desintegración durante el compostaje:** El material deberá desintegrarse en el proceso de compostaje dejando residuos mínimos del plástico (microplástico) de modo que los residuos de plásticos allí presentes no se distingan con facilidad de los demás materiales del producto terminado; esto quiere decir, que no puede haber un más de un 10% de su paso original [30].
- **Biodegradación:** Se deberá establecer un nivel de biodegradación mediante pruebas controladas [30].
- **Impactos del abono con respecto a la planta:** Los materiales utilizados no deberán tener ningún impacto adverso en la capacidad o la efectividad del compost, esto con respecto al apoyo del crecimiento de la planta. De igual forma, para verificar de manera correcta la efectividad del compost a base de plástico biodegradable, se deberá comparar con compost derivados de residuos biológicos sin adicionar materiales probados o materiales de referencia [30].

1.8.20 ASTM D5338-15 Prueba estándar para determinación de la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en condiciones controladas de compostaje, incorporando temperaturas termofílicas

Se diseñó un procedimiento de la prueba utilizada para la biodegradación aeróbica de materiales plásticos, el planteamiento es el siguiente:

- Obtención del material plástico para la determinación de la biodegradabilidad aeróbica en un sistema de compostaje.
- Obtención de un inóculo de compostaje municipal
- Inicio de proceso de compostaje aeróbico controlado junto con el inóculo.
- Medición del dióxido de carbono desprendido en función del tiempo.
- Evaluación del grado de biodegradabilidad.
- Se calculará el porcentaje de biodegradabilidad gracias al porcentaje de carbono convertido durante la prueba.
- La desintegración del material (plástico) será evaluado de manera visual al finalizar la prueba.

Este es el paso a paso utilizado por la norma para operar de manera correcta y cumplir con los parámetros requeridos para que este tipo de plástico sirva como compostaje [31].

1.8.22 Método de prueba estándar para Determinación de la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en el suelo, enfocada a biorremediación ASTM D5988-18

Este método de prueba busca determinar a nivel de laboratorio las condiciones, el grado y tasa de biodegradación aeróbica de materiales plásticos, incluidos los aditivos presentes en este al estar en contacto con el suelo, de igual esta norma está presente tanto en el paso 2 y 3; esto se debe a que en el último paso esta prueba es utilizada específicamente para biodegradar aeróbicamente el material, con el fin de que los residuos allí presentes sean la base del compostaje; de esta forma, la norma debe ser utilizada y explicada en sus dos puntos correspondientes [32].

Primero consiste en la selección de material plástico para la determinación de la biodegradabilidad aeróbica que este posee, exponiendo el material plástico al suelo para después medir el dióxido de carbono desprendido por los microorganismos en función del tiempo, evaluando el grado de biodegradabilidad [32].

La razón de uso de este método de prueba es lograr medir el grado y la tasa de biodegradabilidad aeróbica de un material plástico expuesto y dejado en el medio ambiente, determinando la

extensión y el período de tiempo durante el cual los materiales plásticos son mineralizados o biodegradados por microorganismos del suelo. Ya que por otro lado la eliminación se está convirtiendo en un problema importante y global con el aumento y el uso cada vez mayor de plásticos, y los resultados de este método de prueba permitirán encontrar una estimación del grado de biodegradabilidad y el período de tiempo durante el cual los plásticos permanecerán en un entorno de suelo aeróbico (ya que principalmente es allí donde se encuentran o terminan después de su uso). Este método logra determinar el grado de biodegradación aeróbica midiendo el dióxido de carbono desprendido en función del tiempo que el plástico está expuesto al suelo [32].

1.8.22 Prueba estándar para el equivalente de humedad de centrifuga de suelos

El equivalente de humedad de la centrifuga de los suelos se determinará extrayendo y posteriormente secando el aire una muestra de suelo. Se deben seleccionar dos especímenes de prueba de 5 g de la muestra y se sumergirán completamente en agua destilada o desionizada. Las muestras se centrifugan durante 1 hora a una fuerza igual a 1000 veces la de la gravedad y de igual forma a una temperatura constante de 20°C. El contenido de humedad se determina después de centrifugar.

2. REVISIÓN DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES QUE APLICA COLOMBIA PARA EL USO DEL PEBD OXO-BIODEGRADABLE

2.1 Normas Nacionales

Para el desarrollo del objetivo 1 se utilizaron estándares nacionales e internacionales, en donde se observó, que, aunque la regulación colombiana no tiene en cuenta ninguna normativa clara para el PEBD oxo-biodegradable, se toman 2 de los estándares internacionales más relevantes los cuales son usados por la empresa productora del PEBD oxo-biodegradable [33] con el fin de analizar el PEBD oxo-biodegradable. Cabe resaltar, que esta normativa internacional no afecta o impide la restricción del plástico en lo absoluto en Colombia.

Por otro lado, se encuentra que en el 2012 no existía en Colombia ningún tipo de incentivo u obligación que pudiera forzar a los expendedores o compradores de PEBD tradicional, ya sea a nivel empresarial o doméstico a adquirir o producir un tipo de plástico más amigable con el medio ambiente o menos contaminante. Por el contrario, se resalta que a nivel alimentario y de empaquetado, la norma indica que todas las pruebas, recolección, tecnologías y demás; deben ser compradas y verificadas por parte de la empresa productora para así certificar que realmente se está produciendo o utilizando plástico biodegradable; por lo tanto, aunque algunas empresas deseaban innovar para disminuir la contaminación por plástico, no encontraban incentivos para incursionar en la biodegradabilidad.

No obstante, lo requerido para certificar el plástico biodegradable entre los años 2012 y 2015 en Colombia era muy complejo al no tener apoyo del gobierno, haciendo que aumentara el precio tanto de producción como de adquisición de este tipo de plástico para los compradores; llegando a la conclusión de que económicamente es mucho más lucrativo o viable producir y vender PEBD tradicional que vender PEBD oxo-biodegradable o PEBD biodegradable.

También se observa que aunque existan algunas resoluciones y una ley para el expendio de PEBD tradicional tales como la resolución 1407 y el decreto 2198 [12], [13]; las cuales especifican el manejo, la producción y adquisición de cualquier material que este hecho o diseñado con PEBD tradicional; no existe información en el país que respalde las bolsas oxo-biodegradables, ni su uso, ni su producción y mucho menos las ventajas que estas poseen frente a las bolsas o materiales hechos de PEBD tradicional. En resumen, Colombia está atrasado en normas que regulen nuevos plásticos más amigables con el medio ambiente, entre ellos los oxo-biodegradables.

Es decir que Colombia es un país que debe buscar otras alternativas para reemplazar bolsas plásticas tradicionales que ya se sabe, estos generan un impacto negativo al medio ambiente; aunque la separación de basura, las metas de aprovechamiento, el impuesto a las bolsas y las resoluciones vigentes para recolección de envases y empaques ayudan a mitigar su impacto, no son suficientes. Se debe hacer un análisis exhaustivo en si los estudios realizados al PEBD tradicional y las normativa que lo respalda son suficientes si se comparan con respecto a los nuevos tipos de plásticos oxo-biodegradables, biodegradables, fotodegradables o compostables los cuales no tienen un impacto tan drástico en el medio ambiente; además, sabemos estos tienen diversas pruebas y normas internacionales que los respaldan, como las ASTM y las ISO; o si por el contrario es necesario realizar estos estudios fisicoquímicos y microbiológicos a nivel nacional para estos nuevos tipos de plásticos mencionados anteriormente con el fin de adquirir nuevos plásticos que reemplacen el PEBD tradicional. En este orden de ideas, se debe implementar e incentivar a los productores a buscar otras opciones o en su defecto a realizar análisis de laboratorio a las nuevas tecnologías “oxo” que certifiquen la veracidad del material biodegradable y de igual forma se apoyen en las normas ASTM que respaldan a este a nivel internacional.

Cabe resaltar, que las empresas colombianas tienen una meta de aprovechamiento clave, en donde si la cumplen obtendrán descuentos e incentivos que reducen los costos tributarios de producción y venta; la meta de aprovechamiento se rige por la siguiente ecuación:

$$\%AREE = \frac{QMA}{QMPPM}$$

Donde:

%AREE= Porcentaje de aprovechamiento de residuos de envases y empaques.

QMA= Peso total del residuo aprovechado en el año de evaluación, en toneladas.

QMPPM= Peso total de envases y empaques puesto en el mercado año base, en toneladas.

De igual forma el decreto 2198 de 2017, está basado en una de las normas ASTM la cual soporta el concepto de biodegradabilidad que se utiliza en Colombia para poder definir con exactitud si un plástico es biodegradable o no; esta norma es la ASTM D6400-04 la cuál explica el manejo que se le deben dar a los plásticos destinados a compostaje. Además, no existe o no se contempla un porcentaje de degradación del 90% o el 100% según el decreto 2198 [13]; por lo cual podemos analizar que las normas Colombianas para el PEBD están demasiado anticuadas, esto se debe a que

se sigue planteando utilizar PEBD tradicional en todo tipo de empresas, la única diferencia es la tarifa mínima que se le cobra a los consumidores en el caso de las bolsas plásticas; actualmente el PEBD oxo-biodegradable según la empresa fabricante de la tecnología d2w es capaz de degradarse el 99% bajo condiciones de estrés propicias tales como luz, fricción y temperatura, minimizando el impacto ambiental.

Dicho de otra manera actualmente no se encuentra en Colombia una norma o decreto el cual prohíba el uso y la comercialización del PEBD tradicional; un punto clave del uso que se le da a este plástico, son las bolsas plásticas para mercado o compras, entregadas tanto en las tiendas de barrio como en los supermercados de cadena o inclusive en locales de ropa y otros; aunque se ofrezca la opción de adquirir bolsas de tela las cuales son reutilizables, para el consumidor es mucho más práctico y económico pagar \$50 pesos de una bolsa plástica a comprar otra en \$10.000 pesos o más. Por lo tanto, la solución no es darles un precio extra a las bolsas tradicionales o en general al plástico tradicional; ya que como sabemos el uso que se le da al plástico es necesario; por lo tanto, se deben cambiar las bolsas de PEBD tradicional y también prohibir su venta y producción con el fin de optar por tomar las nuevas alternativas presentadas en el mercado internacional tales como las bolsas fotodegradables, oxo-biodegradables o biodegradables mencionadas anteriormente y sacarles el máximo provecho, eliminando la problemática de la contaminación severa por bolsas plásticas tradicionales.

Por último, el punto clave para poder reemplazar el PEBD tradicional, debe centrarse en la producción y en la adquisición de nuevas tecnologías y tipos de plásticos amigables ambientalmente, el país entero debe hacer un cambio radical frente a el PEBD tradicional ya que sabemos es un gran foco de contaminación no solo a nivel colombiano, si no del mundo entero; pues ya existen diversas opciones las cuales pueden ser analizadas a nivel económico para verificar su viabilidad haciendo énfasis y comparando la ganancia que se puede obtener ambientalmente frente a su costo de adquisición o producción; pero en resumen se considera que el país debe estar enfocado en cambiar completamente el uso convencional del plástico tradicional por parte tanto de sus productores como de compradores.

2.2 Normas Internacionales

Como se observa en la norma ISO 17556, existe una aclaración en el desarrollo de la norma, la cual es “la norma ISO 17556 se enfoca en simular un proceso degradativo a nivel ambiental, más los resultados entre una y varias réplicas pueden ser distintas” [14]; esto quiere decir que aunque ellos están tratando de replicar el suceso degradativo que puede ocurrir con el PEBD oxo-biodegradable a nivel ambiental, no siempre se van a lograr los mismo resultados entre cada una de las réplicas, en donde tendrán un margen de error grande; cabe resaltar, este margen de error trata de reducirse mediante el control de la humedad en la prueba. El factor clave a analizar es si realmente las bolsas lograrán degradarse en cualquier tipo de ambiente, teniendo en cuenta lo anterior y que para obtener un porcentaje de degradación del 70% se debe dejar el material plástico un tiempo mínimo de 8 meses a humedad controlada, la respuesta puede ser negativa; en resumen el plástico difícilmente se degradará, esto lo menciona Francia en una de sus conferencias junto a la empresa Symphony environmental, en donde el país francés aún no cree que el plástico oxo-biodegradable tenga las propiedades para reemplazar completamente a los demás plásticos, por ende actualmente se están haciendo más estudios y pruebas tanto en el medio terrestre, como en el marítimo “un estudio importante aún en proceso, es el estudio de Oxomar; el cuál analiza el porcentaje de degradación del plástico en el mar” [33].

También se encuentra que a diferencia de la norma ISO 11266, que se utiliza para una variedad de compuestos orgánicos, la ISO 17556 está especialmente diseñado para determinar la biodegradabilidad de materiales plásticos y la empresa “Symphony environmental” [33] la utiliza como base para los plásticos oxo-biodegradables [14].

Esto objetivo se desarrolló mediante la revisión de normas nacionales e internacionales emitidas entre los años 2000 y 2020 que rigen en Colombia para la producción de plásticos oxo-biodegradables, principalmente de:

- Congreso de la República de Colombia
- Ministerio de ambiente
- Normatividad francesa ISO

3. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE TESTEO QUE MIDEN EL GRADO DE BIODEGRADACIÓN DE LOS PLÁSTICOS OXO-BIODEGRADABLES.

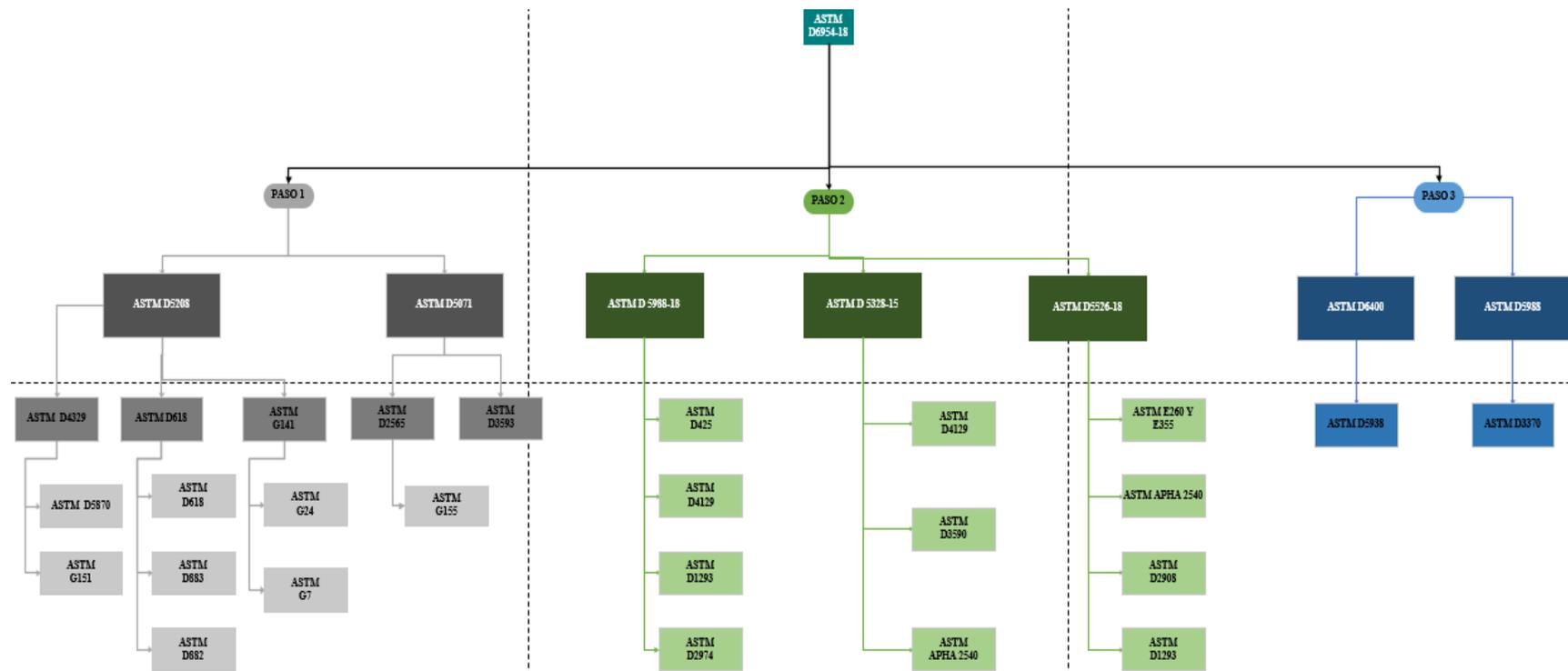
Para el desarrollo del segundo objetivo, se presentan de forma esquematizada los diferentes estándares de calidad analizados, junto con su respectiva convención para la identificación de los diferentes estándares, posteriormente se analizan las normas ASTM, siendo el estándar ASTM D6954: guía para exposición y prueba de plásticos que se degradan en el medio ambiente por combinación de oxidación y biodegradación, la norma principal. Además de esto, la norma principal es dividida en 3 pasos como la norma principal lo menciona y se desarrollan las demás a partir de esta afirmación.

De modo que en el paso 1 se encuentran todos los estándares dirigidos a las pruebas de los plásticos y su respectivo proceso de oxidación, para el paso 2 se encuentran todos los estándares que buscan determinar el porcentaje de biodegradación que experimenta el polímero a diferentes condiciones ambientales y por último en el paso 3 se encuentran los estándares dirigidos a las pruebas de ecotoxicidad luego de que los plásticos son descompuestos.

Sin embargo, es importante recalcar que ya que existen variedad de pruebas experimentales para medir el grado de biodegradación y oxidación de plásticos, estos métodos de prueba experimentales no son equivalentes para entornos donde se presenten alteraciones en las condiciones ambientales. Por ese motivo es necesario definir diferentes características generales para la medición de biodegradación en donde se requiere realizar un monitoreo detallado de: la acumulación de biomasa, agotamiento de sustratos, productos generados y cambios en las propiedades del sustrato. Así como también especificar si ocurre biodegradación a condiciones aeróbicas o anaeróbicas, en ambientes acuáticos como en el caso de zonas de tratamiento de aguas residuales o ecosistemas marinos, o si por el contrario se realiza en ecosistemas terrestres con alto contenido de sólidos como rellenos sanitarios. Dicho esto, la ilustración presentada a continuación presenta todos los estándares analizados [5].

Figura 4.

Estándares que supervisan plásticos biodegradables.



Nota. Estándares de degradación de plásticos presentados de forma esquematizada. Convenciones: Gris dirigido a pruebas para plásticos, verde dirigidos a pruebas y test en los suelos para medición de biodegradación. Azul dirigido a pruebas de ecotoxicidad.

3.1.1 Paso uno

En este paso se analiza cómo funcionan, qué variables y cómo se manejan los márgenes de error en las pruebas de fotodegradación de las normas ASTM, recalando que vacíos tiene la norma frente a las pruebas, como pueden ser estas complementadas y debatir si realmente estas pruebas justifican la degradación del PEBD oxo-biodegradable.

Las normas ASTM que evalúan la degradación de plásticos mediante luz; son las “ASTM D5208” la cuál es una prueba realizada mediante luz UV y la “ASTM D5071-06” la cual corresponde al análisis del PEBD oxo-biodegradable mediante luz de un arco de xenón; cabe resaltar, que aunque se tenga mayor velocidad en la adquisición de datos en la prueba con arco de xenón, se aumenta el margen de error considerablemente. Se evidencia que los procesos deberían estar ligados a realizar pruebas de tensión para las láminas ensayadas y no simplemente calcular su porcentaje de degradación con respecto a la luz (UV), esto debido a que un análisis de degradación no certifica que realmente el plástico va a degradarse en su totalidad y por esto tampoco asegura no dejar residuos de microplástico aún más peligrosos para el medio ambiente, en otras palabras no se puede afirmar que el plástico se mineralice, esto quiere decir que no podrá degradarse convirtiéndose en dióxido de carbono, agua y biomasa completamente; por esto la pruebas deberían incluir en sus métodos el análisis de propiedades tensiles, de esta forma la norma estaría mucho más completa aclarando que las propiedades tensiles cambian completamente luego de forzar las láminas de plástico a condiciones de estrés constantes, por lo tanto deben ser evaluadas inmediatamente termine el primer ensayo de luz UV y posteriormente luego de cada réplica; cabe aclarar que esto hace mucho más completo el ensayo, sin embargo no certifica que el plástico se degradará en su totalidad. De igual forma, estas 2 pruebas evalúan la degradación mediante un microscopio de fuerza atómica por el cual se evidenciarán pequeñas rupturas del plástico y se tomarán medidas de cada una de ellas, entre mayor es la ruptura observada, mayor fue el grado de degradación de la lámina utilizada.

Adicionalmente, se evidencia en la práctica de luz UV ASTM D5208 que el tiempo de exposición es muy corto teniendo en cuenta que es de 4 horas [16]; esto sumado a que no se hace ningún uso de un catalizador para aumentar la velocidad de reacción y posteriormente el deterioro de bolsa basados en esas 4 horas de exposición. Por lo que se deberían aumentar los tiempos de exposición o utilizar la fotocatalisis con el fin de verificar que la bolsa se degrade a un 90% y esta no se fraccione en su mayor parte generando residuos de microplástico; por esto, se debe revisar más a

profundidad el manejo los posibles residuos de plásticos producidos luego de la fotodegradación o por el contrario, realizar pruebas que certifiquen mediante la normativa el uso de fotocatalisis, la cual servirá como prueba acelerada de degradación alcanzando el porcentaje necesario para llegar a la mineralización el cuál es del 99%.

Cabe resaltar, en la norma ASTM D5071-06 [27] existen límites de desviación para cada una de las variables analizadas ya delimitados por la norma, haciendo más precisa la prueba con arco de xenón cuando esta se realiza, los límites van de la siguiente forma:

Tabla 4.

Desviación máxima

Parámetro	Desviación máxima permitida
Temperatura del panel negro	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$
Temperatura del aire de la cámara	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
Humedad relativa	$\pm 5\%$
Irradiancia de 340nm	$\pm 0,02\text{W}/\text{m}_2$
Irradiancia de 300nm-400nm	$\pm 20\text{W}/\text{m}_2$

Nota. Tabla que ofrece desviación máxima dependiendo de cada parámetro a analizar, tomado de ASTM D5017-06, Link de acceso: <https://ezproxy.uamerica.edu.co:2127/CUSTOMERS/search/VIEW/web/viewer.html?file=D6836.851.pdf>.

También la norma ASTM G151-19 plantea y aclara que las pruebas de luz ya sean aceleradas o no, no pueden asemejarse a la degradación natural por luz solar [20]; esto quiere decir que, aunque se encuentren resultados positivos frente al plástico y parezca ser menos contaminante frente al PEBD tradicional en las pruebas de laboratorio, estas no pueden asegurar que ocurrirá exactamente lo mismo a condiciones ambientales reales, ni mucho menos afirmar que estas van a degradarse solo con luz solar. Además de esto, los ensayos tienen demasiadas variantes no dependientes del experimentador, en donde se observa que se busca acondicionar los plásticos y el ambiente al cuál se expone mientras se realizan las pruebas para así reducir el porcentaje de error y la diferencia entre datos obtenidos; por lo tanto, no es del todo confiable. Al ser una prueba dependiente de

variables controlables, por lo que se debe modificar lo necesario para reducir el margen de error ya que sabemos el experimento es a nivel de laboratorio.

Así como también el verdadero problema se da en el ensayo o la comprobación de que realmente un plástico es fotodegradable si se trabajan en ambientes con diferentes variables como temperatura ambiente, humedad, presión y demás. Entonces se deberá realizar el montaje de un laboratorio completamente aislado, hermético y controlado electrónicamente; de esta forma se podrían manejar y controlar variables de manera adecuada, aclarando que, aunque no simula condiciones naturales, hay una disminución considerable en el margen de error de los datos.

Otras pruebas que también se efectúan son aquellas realizadas a la intemperie y a condiciones ambientales tales como lo muestra la ASTM G7-13 [25]; en donde el plástico es colgado en rejillas y expuesto al sol. El principal inconveniente de estas pruebas es la variación en los resultados, esto se da debido a que se tienen que exponer los plásticos simultáneamente o en la misma época del año, en este caso con preferencia en verano; aclarando que, si el día 1 se realiza el primer ensayo, las condiciones climatológicas del día 2 serán totalmente diferentes al anterior, de tal modo que se encontrará una baja correlación entre los datos obtenidos en el día 1 y 2. Cabe resaltar, aunque este tipo de pruebas se haga directamente tratando de imitar la degradación a condiciones naturales, nadie puede asegurar que el plástico que está expuesto directamente al sol tenga constante fricción o altas temperaturas que aumenten las condiciones de estrés del material y posteriormente promuevan la degradación; por esto, surge la duda si realmente el plástico será capaz de degradarse al año como su fabricante lo indica, o si por este no logra degradarse totalmente y se dará la formación de microplástico resaltando que este es mucho más contaminante que las bolsas tradicionales; ya que esta es una de las mayores incógnitas o variables que las normas ASTM no mencionan y la posible obtención de residuos microplásticos al no obtener una degradación completa; en ninguna de las normas, ni en las especificaciones de la empresa se encuentra esta respuesta.

También, América Retail ha puesto en tela de juicio el PEBD oxo-biodegradable mencionando que este es mal llamado biodegradable y es una estafa para el consumidor, debido a que, aunque el plástico se degrade visualmente nada establece o asegura no se convertirá en pequeños pedazos de plástico mucho más nocivos para el medio ambiente [34]. Por lo que el verdadero problema es asegurar que las bolsas plásticas no se fracturen y se degraden completamente, lo que nos hace cuestionar si realmente las bolsas serán capaces de biodegradarse en cualquier ambiente natural en

el cuál puedan terminar luego de su proceso de uso o si por el contrario para poder cumplir este proceso degradativo se debe buscar un ambiente preciso y específico difícil de encontrar naturalmente para degradarse.

3.1.2 Paso dos

En este paso se analiza el proceso de biodegradación que manejan las normas ASTM; recalando nuevamente son estas las que respaldan el plástico oxo-biodegradable, por lo que se revisa cuáles son las condiciones de trabajo, si la biodegradación es estudiada en un ambiente natural o si por el contrario se hace en el laboratorio a condiciones específicas.

De la misma forma se observa una situación similar en las practicas referenciadas anteriormente por la norma principal ASTM D6954-18. En el paso dos, las pruebas van dirigidas únicamente al proceso de biodegradación que experimenta el plástico oxo-biodegradable, en primer lugar es necesario resaltar que el proceso de oxo-biodegradación debe ser realizado a condiciones ambientales específicas, de manera que sea posible controlar la posible generación de residuos microplásticos en caso que no se biodegrade completamente; motivo por el cual al evidenciar que un plástico oxo-biodegradable al sufrir un proceso de biodegradación puede generar residuos tóxicos y microplásticos nocivos para la salud, las diferentes organizaciones encargadas de los estándares internacionales de calidad desarrollaron una de las normas más importantes correspondiente a la ASTM D6400; la cual especifica de manera estándar el etiquetado de plásticos diseñados para compostaje aeróbico en instalaciones municipales o industriales, adicionalmente establecieron la obligación de realizar pruebas de testeo y criterios de calidad para la aprobación de los diferentes plásticos biodegradables, aplicada también para PEBD oxo-biodegradable, resaltando las siguientes características que estos materiales deben cumplir para aprobar los mencionados criterios [5]:

- Estimación del grado de biodegradabilidad del plástico según composición y estructura química del plástico original.
- Ausencia de compuestos tóxicos o nocivos añadidos en el momento de su elaboración.
- Determinación del grado de biodegradación a causa de los microorganismos.
- Cuantificación de demanda de oxígeno, y generación de dióxido de carbono o metano en relación con el tiempo en que se generaron los productos.

- Determinación del grado de desintegración del material, simulando condiciones ambientales reales o simuladas.
- Análisis físicos y químicos al compostaje utilizado para verificar su calidad.
- Pruebas de ecotoxicidad.

Dicho esto, las tres practicas principales: ASTM D5988-18, ASTM D5338-15 y ASTM D5526-18: plantean escenarios diferentes donde ocurre el proceso de biodegradación. La primera practica ASTM D5988-18 determina el porcentaje de biodegradación aeróbica en suelos, ya que este es considerado una mezcla solida heterogénea, constantemente influenciada por los efectos climáticos. Esto determina la naturaleza del suelo y da lugar a que sea un hábitat ideal para la proliferación de diferentes microorganismos según las condiciones en las que este se encuentre [3]. Adicionalmente es necesario que el pH del suelo donde se espera ocurre el proceso de biodegradación se encuentre entre 6 y 8, evitando variaciones que inhiben la formación bacteriana. En caso de este sea mayor, el suelo tendrá tendencia a retener mayor porcentaje de dióxido de carbono, afectando los cálculos para determinar el porcentaje de dióxido de carbono generado. En cuanto a la composición que debe tener el suelo corresponderá a ser suelos compactos arcillosos, que garantiza la colonización de bacterias aeróbicas y bacterias microaerófilas facultativas. Así como el contenido de oxígeno debe ser suficiente para que microorganismos aeróbicos promuevan la biodegradación y a su vez el contenido de dióxido de carbono se encuentre en menor concentración [3].

Cabe resaltar que esta práctica está diseñada simulando condiciones donde el material plástico oxo-biodegradable residual está parcialmente desintegrado y se encuentra bajo la superficie del suelo donde ocurre el proceso de biodegradación. Sin embargo, para plásticos oxo-biodegradables de mayor tamaño, que requieren de un pre tratamiento para disminuir su tamaño y aumentar su área de contacto, lo cual se realiza por medio de operaciones como la molienda para ser mezclados con suelo biológicamente activo, para promover la biodegradación del plástico [26].

Así mismo es necesario que esta práctica utilice prueba de respiración, el cual es un método principalmente aplicado para biodegradación aeróbica, proceso que requiere la presencia de oxígeno para la oxidación de los compuestos del plástico, generando minerales, dióxido de carbono entre otros gases. Por esta razón se debe determinar la demanda biológica de oxígeno requerida (DBO) en la reacción de oxidación del sustrato, además es posible comparar este parámetro con la

demanda teórica de oxígeno (TOD), y finalmente comparar los resultados obtenidos teniendo en cuenta la estequiometría de la reacción de oxidación. No obstante, una desventaja que se observa es que esta prueba no permite designar el grado de biodegradación del plástico oxo-biodegradable [3].

Es importante recalcar que este método pretende simular condiciones ambientales reales de biodegradación, suponiendo escenarios ambientales terrestres donde se supone estos plásticos oxo-biodegradables deben biodegradarse por causa de la presencia microbiana en el ambiente, sin embargo la principal desventaja que presenta este método es el tiempo necesario que requiere el método para llevarlo a cabo en su totalidad, es muy lento y no ofrece información detallada sobre el tiempo real en las propiedades físicas y químicas del material, ni el porcentaje de biodegradación [5]. Es decir que al suponer situaciones ideales donde el material plástico oxo-biodegradable residual termina su ciclo útil de vida, en suelos biológicamente activos y además de considerar que la presencia de otros materiales residuales provenientes de otras fuentes como por ejemplo escombros, residuos de plantas o residuos inertes como piedras frecuentemente situados en suelos, no estará presente, en ese orden de ideas, en caso contrario, donde no se consideren las mismas condiciones ideales que propone la práctica, el porcentaje de biodegradación no corresponderá a valores similares que el anterior, es decir que esta práctica busca verificar que un plástico oxo-biodegradable puede llegar a biodegradarse únicamente en condiciones ideales, sin embargo el problema radica en que hoy en día es imposible que las condiciones ideales ocurran sin manipulación previa alguna, sumado a esto, usualmente el plástico oxo-biodegradable residual que termina siendo arrojado evidentemente contendrá cierto contenido de residuos según el uso que haya tenido, de ser así el polímero, no se comportará de igual manera que si este fuera prístino. Adicionalmente en la práctica no se considera necesario una desintegración previa del plástico, por lo tanto, el proceso de biodegradación definitivamente no podría realizarse correctamente, además recordemos que el proceso de biodegradación usualmente ocurre bajo la superficie del suelo, situándose a cinco metros bajo la capa principal del suelo. Razón por la cual este incluso ni llegaría a biodegradarse parcialmente.

Para concluir si bien la práctica está dirigida a la biodegradación que experimenta un plástico oxo-biodegradable, no obstante, no abarca todos los posibles escenarios reales en que usualmente esta situación se daría, por ende podría decirse que aplica para verificar el porcentaje de biodegradación únicamente suponiendo condiciones ambientales controladas e ideales, pero que para esto es

necesario tanto el previo deterioro de este, como garantizar que el tamaño del plástico oxo-biodegradable haya sido reducido al máximo, de modo que la biodegradación ocurra debajo de la superficie del suelo.

En cuanto a la segunda practica principal ASTM D5338-15 que determina el porcentaje de biodegradación aeróbica en modo compostaje, es posible hacer uso de esta método ya que el compostaje es una técnica encargada de reciclar diferentes tipos de materia orgánica, razón por la cual es aplicada en esta práctica al considerar que el material plástico oxo-biodegradable junto con la presencia de desechos biológicos, es adecuado para ser utilizado como materia prima en el uso del compostaje y así fomentar el proceso de biodegradación. Sin embargo, existen dos tipos de compostaje los cuales no se encuentran especificados en la práctica mencionada anteriormente, los cuales corresponden a ser compostaje de tipo industrial o doméstico [35]. Igualmente, los resultados serán completamente diferentes, tanto para el porcentaje de biodegradación obtenido como para el tiempo estipulado. No obstante, los dos tipos de compostaje están determinados por las mismas etapas, las cuales son: etapa mesófila, termófila, enfriamiento y maduración. Todas están determinan el resultado final del compostaje y el mecanismo de biodegradación a causa de los microorganismos presentes [5].

Por ende durante toda la práctica es necesario realizar el respectivo monitoreo y control de la temperatura, la cual debe iniciar a temperatura ambiente e ir aumentando hacia los 45 °C, para que la presencia de bacterias aeróbicas heterótrofas logren descomponer las sustancias orgánicas simples en agua y dióxido de carbono, lo cual influye en la actividad microbiana, aumentando y fomentando la reproducción bacteriana, es entonces la etapa más importante donde las bacterias pasan de ser mesófilas a termofílicas, y la temperatura debe aumentarse a los 70 °C, podría considerarse la etapa donde microorganismos heterótrofos y autótrofos llevan a cabo el proceso de biodegradación donde descomponen la mayor cantidad posible de sustrato correspondiente los residuos preseleccionando, por último la etapa de enfriamiento y maduración, la temperatura debe descender de los 60 °C a hasta temperatura ambiente. Donde finalmente el compostaje puede ser utilizado como fertilizante según sus propiedades. En ese caso es importante recalcar que el compostaje doméstico, lo realizan individuos voluntariamente y debido a que el monitoreo y control de la temperatura a lo largo del proceso no está garantizado, este puede tardar más de un año en llevarse a cabo, y para experimentos a nivel de laboratorio se debe mantener la temperatura

constante a 58°C, simulando condiciones de compostaje industrial real, estimando un plazo de 6 meses para llevar a cabo el proceso de biodegradación [5].

Además, es posible desarrollar este proceso para sistemas abiertos o cerrados, para sistemas abiertos como su nombre lo indica podría tratarse de un relleno sanitario gracias a la presencia de microorganismos en este ambiente, en cuanto a sistemas cerrados, se refiere a la posibilidad de llevar a cabo el proceso en biorreactores, este último ha facilitado la implementación de métodos de prueba que determinen el grado de biodegradación por medio de compostaje en sistemas cerrados. Ya que al ser posible determinar y establecer condiciones como temperatura y pH es posible manipular estas variables para los diferentes ensayos experimentales, además de poseer la ventaja de controlar los olores provenientes de la descomposición [5].

Por otro lado, independientemente del sistema que sea utilizado es importante que el compostaje cumpla con diferentes condiciones para que el proceso sea exitoso, uno de los factores claves es el contenido de humedad, ya que la falta de agua ocasiona la reducción en la actividad microbiana. Así como también se debe garantizar la presencia de aire y oxígeno, para que la degradación no se ralentice, así mismo garantizar la eliminación de gases, y control de la temperatura, ya que esto favorece la fase de degradación intensiva. [5].

Finalmente, la tercera practica principal ASTM D5526-18 en donde se determina el porcentaje de biodegradación anaeróbica bajo condiciones de vertedero, simulando condiciones ambientales a rellenos sanitarios o como su nombre lo indica vertederos, pretende biodegradar la mayor cantidad posible de residuos orgánicos provenientes de diferentes fuentes. Sin embargo, para que el proceso de biodegradación anaeróbica se realice satisfactoriamente, deben desarrollarse dos etapas, la primera fase consta de la fermentación anaeróbica, seguido de un compostaje con presencia de oxígeno, dado que para la primera fase no garantiza la madurez del material residual, lo cual se consigue con la fase de compostaje aeróbico, y así obtener como producto final la materia residual el cual puede ser usado como fertilizante según sus propiedades.

De igual manera es necesario realizar pruebas de ecotoxicidad, teniendo en cuenta metabolitos tóxicos, y así determinar el grado de toxicidad de las sustancias generadas, junto con su impacto ambiental [5].

Adicionalmente las tres practicas mencionadas anteriormente, referencian a su vez otros estándares de calidad, para monitorear y establecer las diferentes condiciones ambientales a las cuales debe

realizarse el proceso de biodegradación que experimentan los plásticos oxo-biodegradables, de manera que sean controladas para garantizar el crecimiento y la actividad de los microorganismos responsables del proceso de biodegradación, los cuales son analizados a continuación.

Empezando con la prueba estándar ASTM D425-17 que determina la humedad centrifuga equivalente en suelos, la humedad equivalente centrifuga corresponde al contenido de agua en suelos, luego de ser sometido a fuerza centrífuga, con el objetivo de terminar la capacidad mínima de retención de agua por parte del suelo.

Sin embargo, este método solo aplica para muestras de suelo arenosos con partículas menores a 2 mm [36], en caso contrario corresponde aplicar otras técnicas como extracción a presión e incluso centrifugación [37].

Por otro lado se observa la importancia de suministrar suelos con contenidos de humedad adecuados puesto que es imprescindible para el ciclo de vida y actividad de los microorganismos encargados de la biodegradación, por tal motivo es necesario realizar el previo análisis al suelo que será utilizado, así como también debido a la variedad de tipos de suelos existentes, en caso de ser necesario identificar el suelo, es necesario recurrir a la práctica estándar para la descripción e identificación de suelos donde se describen las diferentes características para la identificación del mismo [5].

Así mismo se debe determinar el pH, ya que es una variable importante a la hora de garantizar la presencia de microorganismos por lo cual se referencia la prueba estándar ASTM D1293-18 para determinar pH en agua por electrometría.

En cuanto a determinar el contenido de materia orgánica y/o arcilla en suelos, las practicas principales referencian el test ASTM D2974-20, exponiendo el método más utilizado para la cuantificación de este, sin embargo es posible determinar el contenido de materia orgánica en suelos por medio de oxidación con dicromato como alternativa al método expuesto en el test, el procedimiento consta de remover compuestos sulfuros y cloruros en caso de ser necesario, adicionando ácido sulfúrico diluido y agua destilada respectivamente, seguidamente se seca en hornos, y se adiciona dicromato de potasio junto con ácido sulfúrico concentrado, y finalmente se titula con sulfato ferroso [31]. La selección del método radica según la disposición de los elementos utilizados en cada técnica, así como los dos métodos garantizan resultados reproducibles para su posterior análisis.

La determinación de carbono orgánico se realiza por medio de oxidación a altas temperaturas y por detección coulométrica como lo referencia la prueba estándar ASTM D4129-20, sin embargo, esta prueba va dirigida únicamente para aguas potables o residuales y aunque recalca la importancia de realizar el test para determinar el contenido total de carbono orgánico en sedimentos o lodos describiendo brevemente el pretratamiento que se le debe realizar, no profundiza en el procedimiento posterior para el cálculo de este [38]. Por ende, se expone la técnica desarrollada para optimizar la remoción de carbono en suelos y sedimento por coulométrica realizando la medición de dióxido de carbono generado constantemente [39].

El procedimiento corresponde a ser el siguiente: la muestra es separada por centrifugación, el sobrenadante podrá ser desechado o almacenado según se requiera. La fase sólida es mezclada junto con peróxido de hidrógeno hasta completar la oxidación total de la materia orgánica. La muestra pasa a un condensador y son removidos vapores ácidos, se realiza un tratamiento térmico aproximadamente a 950 °C para lograr la oxidación completa de carbono a dióxido de carbono, este es purificado posteriormente con perclorato de magnesio y pasa a la celda del coulometro, el cual a su vez es llenado parcialmente con *mea*. Así como también se sitúan en la celda un cátodo de platino y un electrodo de plata. De manera que cuando pasa la corriente a través de la solución, el dióxido de carbono reacciona junto con monoetanolamina formando ácido hidroxietil carbámico, este es titulado para finalmente realizar el respectivo cálculo. De igual manera este procedimiento permite además determinar el contenido de metales y otros compuestos que puedan estar presentes en el sedimento o suelo analizado [39]

Otra de las variables importantes corresponde a determinar nitrógeno por medio del método Kjeldahl según la prueba estándar ASTM D3590-17, si bien está dirigido para determinar contenido de nitrógeno en agua, es posible aplicar el método sugerido para cuantificar contenido de nitrógeno en suelos, ya que el método Kjeldahl es un procedimiento clásico que determina el contenido total de nitrógeno orgánico presente en la materia orgánica nitrogenada [35]. Este método consta de tres etapas: digestión, destilación y titulación. En la digestión se transforman los componentes orgánicos nitrogenados en amonio y otros productos, posteriormente en la destilación ocurre la alcalinización y condensación de la muestra, donde se transforma el amonio en gas amoníaco, el cual es condensado y recuperado junto con la solución bórico, finalmente la solución es titulada para determinar el contenido total de nitrógeno.

En cuanto a determinar los sólidos totales suspendidos se encuentra referenciado la prueba estándar APHA 2540-17 necesaria para la determinación de estos sólidos una vez finalice el proceso de biodegradación ya que “los diferentes tipos de sólidos son definidos al momento del análisis, según el método usado para su determinación y los resultados obtenidos para sólidos totales, volátiles y fijos están sujetos a errores considerables, por pérdida de compuestos volátiles durante la evaporación de CO₂ y minerales volátiles durante la calcinación” [40].

Otro estándar referenciado corresponde a la práctica ASTM E260-19 para cromatografía de gases en columna empacada. Puesto que la cromatografía de gases es una técnica de separación, es posible aplicarla para la determinación de compuestos orgánicos e inorgánicos una vez finaliza el proceso de biodegradación anaeróbica [41].

El procedimiento ocurre cuando a la columna cromatográfica ingresa la mezcla, en una corriente de gas por medio de un mecanismo de adsorción dentro de la misma, se logra la separación de los componentes de la mezcla inicial gracias a la presencia de una fase estacionaria, la cual se selecciona según su capacidad de retención por medio del método McReynolds el cual se basa en los índices de retención según las fuerzas de atracción moleculares, finalmente el efluente de la columna pasa por un detector eléctrico, el cual registra los datos correspondientes a la concentración de cada componente presente. Sin embargo, la eficacia de la separación está determinada según la técnica de inyección a la columna, como en la columna misma, la cual debe operar a condiciones adecuadas [42].

Esta técnica se conoce como pruebas de evolución de gas (metano o dióxido de carbono) el cual es un método que permite determinar el porcentaje de biodegradación del plástico oxo-biodegradable, al evaluar la evolución de carbono a metano o dióxido de carbono, a lo largo de la práctica. Este método es posible realizarlo en condiciones de biodegradación aeróbica y anaeróbica, por lo que han sido establecidos varios estándares para este método según las condiciones en que se realice. Por otro lado, es necesario determinar la generación de carbono gaseoso, y la cantidad de carbono soluble y sólido en productos generados, pues se presenta situaciones en que, debido a la naturaleza del polímero, el carbono proveniente de la cadena principalmente se convierte en biomasa y no en dióxido de carbono [5]. De igual manera se referencia la prueba estándar ASTM D2908-17 para medir compuestos orgánicos volátiles en agua por medio de cromatografía de gas con inyección acuosa sin embargo, puesto que esta práctica no está dirigida para el análisis de compuestos volátiles provenientes de un vertedero específicamente, se propone realizarlo junto con el método

ASTM D425-17 prueba estándar para determinar humedad centrifuga equivalente en suelos, en donde es posible determinar compuestos volátiles en agua correspondiente al sobrenadante al separar el suelo mediante la centrifugación [27].

Para finalizar con todo el paso dos correspondiente a todas las practicas donde se realiza el proceso de biodegradación, los resultados obtenidos provenientes del paso 1 y 2 pasan a ser analizados en el paso 3, por las diferentes pruebas de ecotoxicidad, una vez finaliza el proceso de biodegradación de los plásticos oxo-biodegradables.

3.1.3 Paso tres

En este último paso se analiza las normas que tratan sobre la ecotoxicidad del PEBD oxo-biodegradable, este será analizado tanto a condiciones de compostaje como en suelos directamente, con el fin de conocer si este realmente será dañino para el medio ambiente.

El paso número 3 se basa en pruebas de ecotoxicidad como se mencionó anteriormente, las cuales son desarrolladas a partir de los residuos producidos y la cantidad de dióxido de carbono producido al descomponerse el material plástico; esto se verifica gracias a la descomposición en suelos de manera aeróbica y el desarrollo de compostajes a partir de plásticos junto con residuos orgánicos como nos indican las normas ASTM D5988-18 y ASTM D6400-19 respectivamente. Ambas pruebas son desarrolladas de manera correcta y se tienen en cuenta las variables externas del mismo; el inconveniente que presenta la aplicabilidad del plástico al compostaje es que el PEBD oxo-biodegradable no es fácil de biodegradar mediante microorganismos, la fase de degradación y la aceleración de la misma dependen directamente de las condiciones de estrés a la cual se vea expuesto el plástico, por lo tanto; se encontrará microplástico en el compost debido a las bajas condiciones propicias para degradar el PEBD oxo-biodegradable haciendo posiblemente no viable la distribución del compost que resulta del proceso. Cabe resaltar, que el material será catalogado biodegradable exclusivamente, si el 90% de su composición al realizar el debido proceso se convierte en carbono, el 1% en materia seca o plástico residual y el otro 9% en dióxido de carbono y demás componentes restantes [30].

Por lo que se debe generar una norma, la cual explique y trabaje a condiciones de estrés con el plástico, adicionalmente es necesario indicar las condiciones adecuadas, esto debido a que el PEBD oxo-biodegradable está soportado en la norma principal y un factor clave para la adecuada degradación de este tipo de plásticos son las condiciones de estrés que propicien que el plástico se

biodegradable; por lo tanto se deben hacer pruebas a nivel natural, no solo de luz solar si no de temperatura, cuestionar cuales son las temperaturas adecuadas para la degradación sin que estas afecten la posible producción de compost utilizando el plástico, y así mismo establecer que otras variables de estrés pueden analizarse, ya que solo es posible determinar fricción, luz y temperatura; de las cuales solo está certificada mediante las normas, la variable de luz. De igual forma se deben evaluar otro tipos de situaciones de eco-toxicidad, como por ejemplo si el plástico se encuentra aislado en un ambiente donde no llega la luz ni hay aumentos bruscos de temperatura, y así mismo cuestionar que sucedería con este, que efecto tendría en el plástico y verificar si este está en la capacidad de degradarse en 1 año como lo indican sus fabricantes; este tipo de escenario es muy posible de ver cuando el plástico se mezcla con el resto de basura impidiendo el paso de la luz solar y dejando casi imposible que se produzca fricción en cada uno de los puntos del plástico.

Por otro lado también, se deben hacer pruebas en el agua con este tipo de plásticos, tanto en agua salada como dulce; aunque actualmente se encuentre en estudio el proyecto “Oxomar” [33] estudio realizado por Francia y la empresa productora del PEBD oxo-biodegradable, el cual arroja resultados de cómo se comporta el plástico en el mar; actualmente la empresa no posee una norma específica para el PEBD oxo-biodegradable que certifique el plástico no generará un daño ambiental a nivel acuático.

Cabe resaltar, que el artículo “Estudio comparativo de la compostabilidad de fundas plásticas de PEBD, oxo-biodegradables y de papel distribuidas en el distrito metropolitano de quitó” [43] menciona que no es posible decidir cuál es el porcentaje de eco-toxicidad del plástico oxo-biodegradable debido a que este es mal llamado biodegradable. Analizando la información contenida, se encuentra que la conclusión a la que se llega en la cual se afirma que el plástico no puede ni debe ser considerado biodegradable, es cierto; para poder entender esto debemos partir del concepto básico de biodegradabilidad, este concepto explica que solo es capaz de darse cuando el plástico se degrada mediante microorganismos a la intemperie; al PEBD oxo-biodegradable son muy pocos microorganismos los cuales son capaces de degradarlo, ya que como sabemos este se hace con un pellet del mismo PEBD tradicional, adicionándole un aditivo pro oxidante que facilita la degradación, pero no a condiciones biológicas; si no térmicas o lumínicas. Esto quiere decir que es más fácil que este se degrade a condiciones solares y térmicas adecuadas más no por medio de un microorganismo encontrado en el ambiente; dicho esto, el verdadero problema será generado cuando estas condiciones de estrés no puedan darse en el ambiente en el que se encuentra y por el

contrario se llegue a la conclusión de obtener el mismo plástico tradicional, que como sabemos tiene un grado de contaminación demasiado alto.

Para el desarrollo del objetivo dos se realizó una búsqueda de artículos en las bases de datos:

- ScienceDirect.
- Leyex.Info.
- Lumieres.
- ASTM Compass.

Empleando como palabras clave:

- Biodegradación.
- Oxo-biodegradable.
- Compostaje.
- Oxidación.
- Eco-toxicidad.

4. PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS PARA LA OXO-BIODEGRADACIÓN

Como se mencionó anteriormente, la característica principal de los plásticos oxo-biodegradables es la capacidad que tienen de biodegradarse por completo a causa de un aditivo pro-oxidante añadido en su proceso de fabricación encargado de inducir su descomposición, es decir que este es el encargado de acelerar el proceso de descomposición inclusive en condiciones ambientales no controladas, por ejemplo, el plástico oxo-biodegradable residual que finaliza su periodo de vida útil en ecosistemas acuáticos, ya sea ríos o mares, así como ecosistemas terrestres como bosques. En ese orden de ideas se espera que los plásticos oxo-biodegradables no generen ningún tipo de residuo al ser desechados. Sin embargo, se evidencian dos problemáticas relacionadas con su proceso de descomposición, la primera está relacionada en su proceso de fabricación, en donde el porcentaje de biodegradación depende de la concentración del aditivo que se utilice. La segunda problemática es que no existen estudios que evidencien que el proceso de biodegradación no arroje como resultado residuos microplásticos o en su defecto se degrade completamente, esto sabiendo que el plástico tiene un gran impacto ambiental negativo, y actualmente se presenta un problema mundial debido a su acumulación.

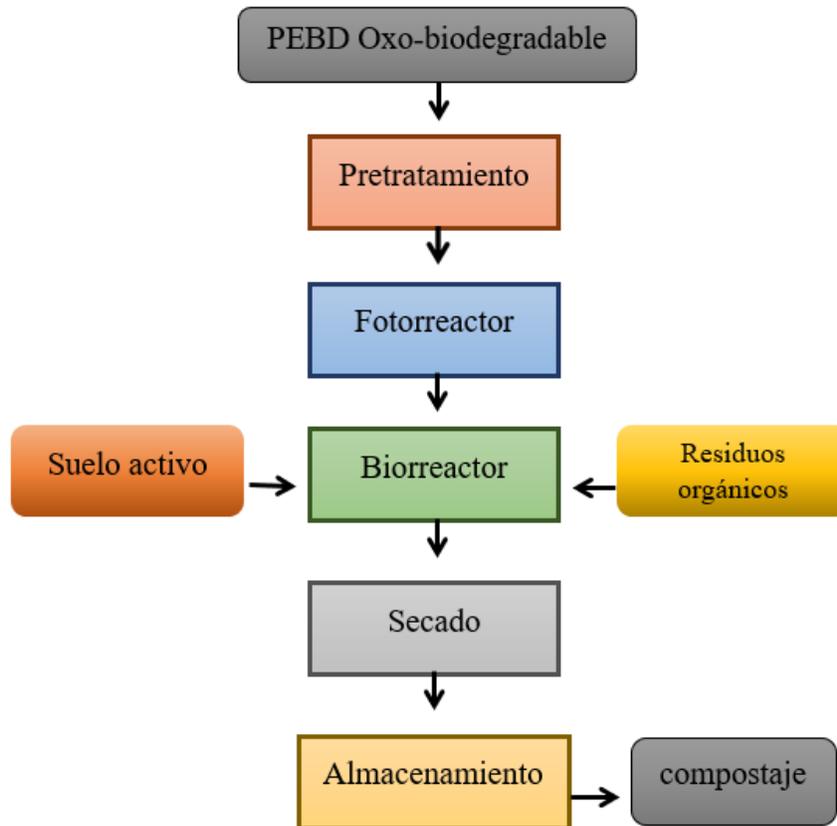
Por tal motivo, no se encuentran actualmente resultados exactos que especifiquen y demuestren que ocurre a condiciones ambientales no controladas, aunque traten de simularlos, e incluso muchas veces es necesario descartar la prueba debido al inmenso margen de error que se da en cada una de las réplicas. Dicho esto se concluye que actualmente se siguen presentando incógnitas en los estudios del PEBD oxo-biodegradable, por lo que actualmente se siguen realizando pruebas que logren asegurar el plástico no tendrá un efecto nocivo ambientalmente; esto teniendo en cuenta que el plástico tiene porcentajes de degradación entre 70%-80%, para ser catalogado como plástico oxo-biodegradable.

Como resultado a este análisis, se plantearon operaciones unitarias con el fin de presentar una secuencia donde se lleve a cabo un correcto proceso de biodegradación en donde además se le dará un valor agregado a plástico al convertirlo en compostaje; de manera que este debe realizarse de forma controlada, teniendo en cuenta los estándares, artículos y técnicas analizadas para la biodegradación de este.

En la siguiente ilustración se resume a nivel general la secuencia del proceso, posteriormente se describen individualmente cada una de las operaciones y procesos unitarios; por último, se presenta el respectivo diagrama de proceso.

Figura 5.

Operaciones unitarias principales



Nota. Operaciones unitarias principales para la obtención de compostaje.

Para comenzar, se deberán tener en cuenta diferentes procesos principales antes de comenzar la oxo-biodegradación, el primero será la recolección del PEBD oxo-biodegradable mediante camiones o volquetas diseñadas únicamente para recoger este tipo de plástico, por otro lado aunque el plástico tenga un tiempo de degradación considerablemente corto de aproximadamente 1 año “a condiciones de estrés”, se deben seguir realizando campañas de separación de residuos y para este caso, incluso sugerir cambiar el PEBD tradicional, por el utilizado en este proyecto. La finalidad

del diseño será el aprovechar los residuos de plástico generando compostaje a partir del plástico y maximizando la utilidad de este.

Luego de que el PEBD oxo-biodegradable sea traído a las instalaciones, un operario debe encargarse de revisar que todo el material ingresado sea específicamente plástico oxo-biodegradable, esto lo realizará mediante la verificación de su sello d2w [33], el cual viene impreso en forma de gota de agua, de esta forma se evitará ingresar plástico que no corresponde a ser oxo-biodegradable al proceso y por ende una contaminación del compost a obtener.

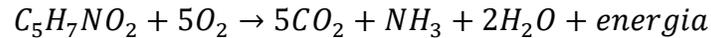
Posteriormente, se procederá a realizar una limpieza por aspersión, la cual consta de tuberías con pequeños orificios, las cuales mediante agua a presión retirarán los residuos sólidos presentes en el material plástico, dejándolo más limpio para el siguiente proceso al que será expuesto, esto debe trabajarse a presiones no muy altas, tales como 14kPa ya que el objetivo es retirar residuos sólidos únicamente.

Luego, este pasa a un secador el cuál aplicará calor en el rango de temperaturas de 50°C-70°C [44] al plástico sin importar que este se cristalice; de esta manera, aumentaremos las condiciones de estrés en el plástico, disminuyendo el tiempo de degradación en el proceso y de igual forma dejando el material pre-tratado y deteriorado, para ingresar al fotorreactor. Cabe resaltar, que es necesario controlar la temperatura de modo que el plástico no sea quemado generando ceniza a partir de este, esto se conseguirá al no sobrepasar el rango determinado anteriormente; esto con el fin de que no se vean afectadas de manera negativa las propiedades del plástico antes de entrar al fotorreactor.

Seguidamente el material plástico oxo-biodegradable ingresa al fotorreactor, el cual debe operar a una presión de 1atm, pH de 4.5 y una longitud de onda para la lámpara de luz UV de 260nm, sumado a esto debe garantizarse la presencia de oxígeno en el fotorreactor inyectándolo directamente con mangueras, puesto que este actúa como agente oxidante. Así mismo, se hace uso de un catalizador a base de dióxido de titanio encargado de inducir la reacción de óxido-reducción, dando lugar al proceso de fotocatalisis, ya que este es basado en reacciones redox, donde según la naturaleza del material que entra en contacto directo con el catalizador, podrá sufrir una reacción de oxidación o de reducción, el cual tiene aplicación en la degradación de diferentes moléculas que lo componen, en este caso la finalidad es descomponer y posteriormente degradar de manera acelerada el plástico oxo-biodegradable residual que ingreso al biorreactor.

De igual forma, es posible hacer uso de otro catalizador; sin embargo, se propone realizar el proceso de fotocatalisis haciendo uso de TiO_2 , ya que este se fundamenta en una reacción redox impulsada por la intensidad de luz UV, debido a la acción ejercida por el par electrón-hueco (e-h) ubicados en la interfaz del catalizador donde la reducción foto catalítica de un aceptor de electrones se lleva a cabo en presencia de un exceso de donador de electrones [45]. El objetivo del donador de electrones es eliminar huecos (h^+) generados en la banda de valencia, mientras que los electrones generados (e^-) en la banda de conducción se transfieren al sustrato orgánico absorbido en el TiO_2 , que se desea degradar. De esta manera se logra la degradación del plástico oxo-biodegradable para el posterior proceso de biodegradación [45].

Como resultado, el plástico fragmentado es enviado a un tanque de mezcla, junto con los desechos orgánicos que para este proceso serán residuos de cáscaras de fruta [46], adicionalmente se mezclan con suelo biológicamente activo, el cual se comporta como inóculo. La mezcla es precalentada a 45°C en el tanque de mezclado a presión atmosférica, seguidamente ingresa al biorreactor, este opera a temperatura constante a 60°C , humedad entre un 50-55%, pH entre 7-8, a presión atmosférica, de esta manera el proceso de biodegradación se lleva a cabo satisfactoriamente. Por otro lado, el biorreactor debe contar con 2 mangueras, una con inyección de oxígeno y la otra destinada a la salida de gases, en caso de que estos llegasen a acumularse dentro del mismo interrumpiendo el proceso [5]. De otro modo en caso de que el contenido de oxígeno no sea suministrado, el proceso de biodegradación ocurrirá anaeróbicamente, ocasionando la generación de metano, además de un producto sólido de compostaje ácido [8]. Por lo que se concluye la importancia de asegurar que las 4 fases para la obtención del compost con pH neutro se lleven a cabo correctamente en presencia de oxígeno, de modo que tanto los microorganismos mesófilos como termófilos descompongan las cadenas del polímero gracias a la secreción de enzimas extracelulares, así mismo a medida que disminuye el sustrato suministrado proveniente de la cadena de polímero, la pérdida de energía o calor metabólico disminuye a su vez, es en este punto cuando el compost finalmente termina la fase de maduración, apto para usos agronómicos como fertilizante gracias a la presencia de compuestos nitrogenados [35]. En cuanto a las reacciones generadas por la oxidación del material PEBD oxo-biodegradable a causa de los microorganismos en su metabolismo son las siguientes [8]:



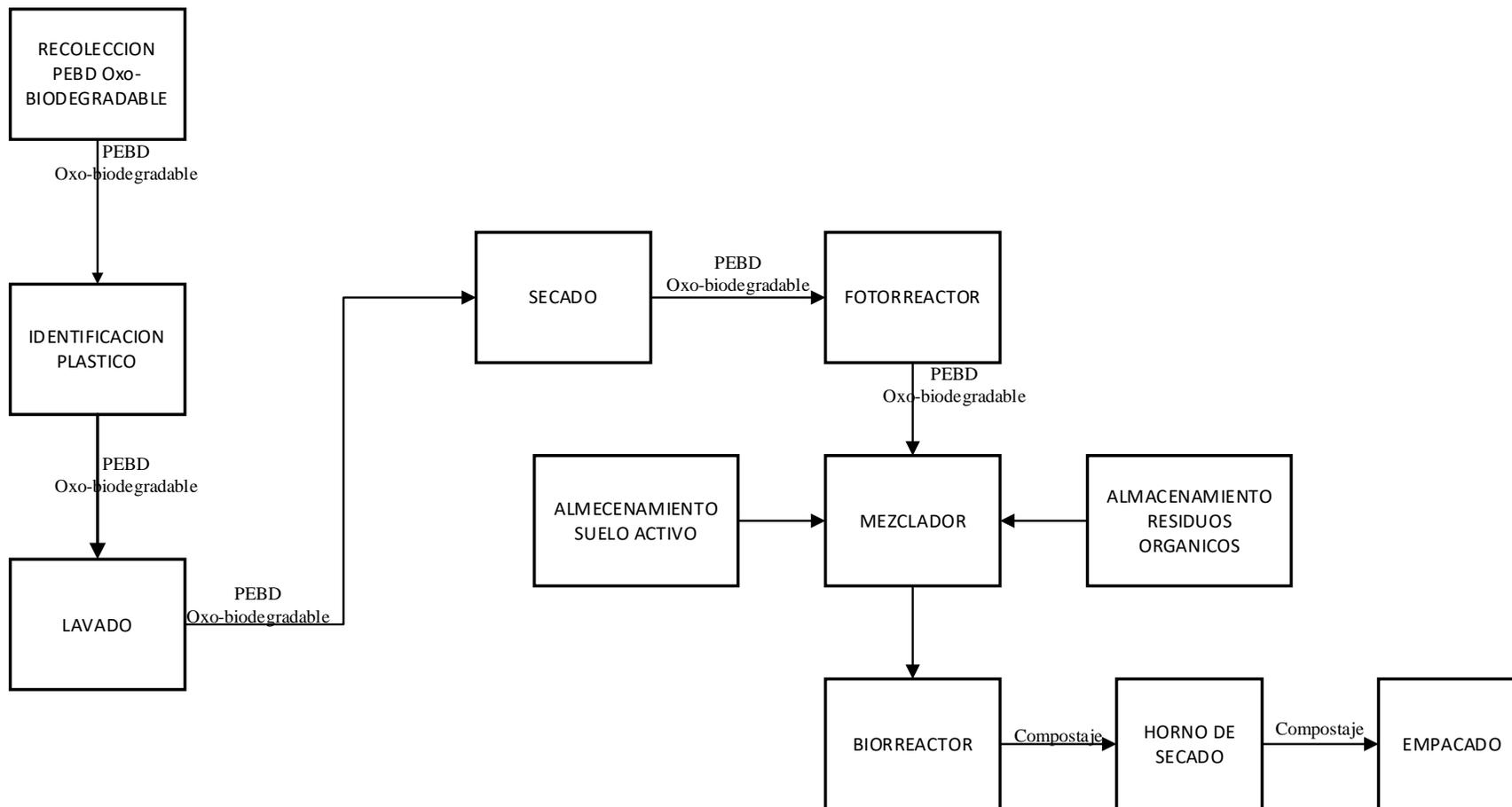
Finalmente, la corriente de salida del biorreactor pasa a un horno de secado, para realizar un tratamiento térmico a condiciones controladas de temperatura a 50°C y presión atmosférica; cabe resaltar que este tratamiento térmico no debe sobrepasar esta temperatura para no dañar el compost. Este tratamiento se lleva a cabo para que la mezcla resultante obtenida del biorreactor, específicamente el compostaje, logrará la oxidación completa de carbono a dióxido de carbono, y simultáneamente se retirará el exceso de agua que este puede contener para que el compostaje finalmente sea empacado y almacenado para su posterior uso como fertilizante. De esta manera se busca mejorar el aprovechamiento de residuos orgánicos y del PEBD oxo-biodegradable, de modo que se diseña un proceso para la obtención de compost para un fin específico, en este caso transformar el plástico y darle un valor agregado al mismo [35].

A continuación, se procederá a mostrar el diagrama de bloques y el diagrama de flujo construidos con la finalidad de mostrar de manera gráfica cual es el paso a paso a seguir en el proceso de biodegradación planteado, posteriormente se presentará la tabla de todos los equipos utilizado con su respectivo ID y el que papel que tienen estos en cada parte del proceso.

Por último, en el objetivo 3 se plantearon operaciones unitarias para la oxo-biodegradación, basado en la información recopilada en los objetivos anteriores sirviendo estos como base de datos para poder diseñar las operaciones unitarias.

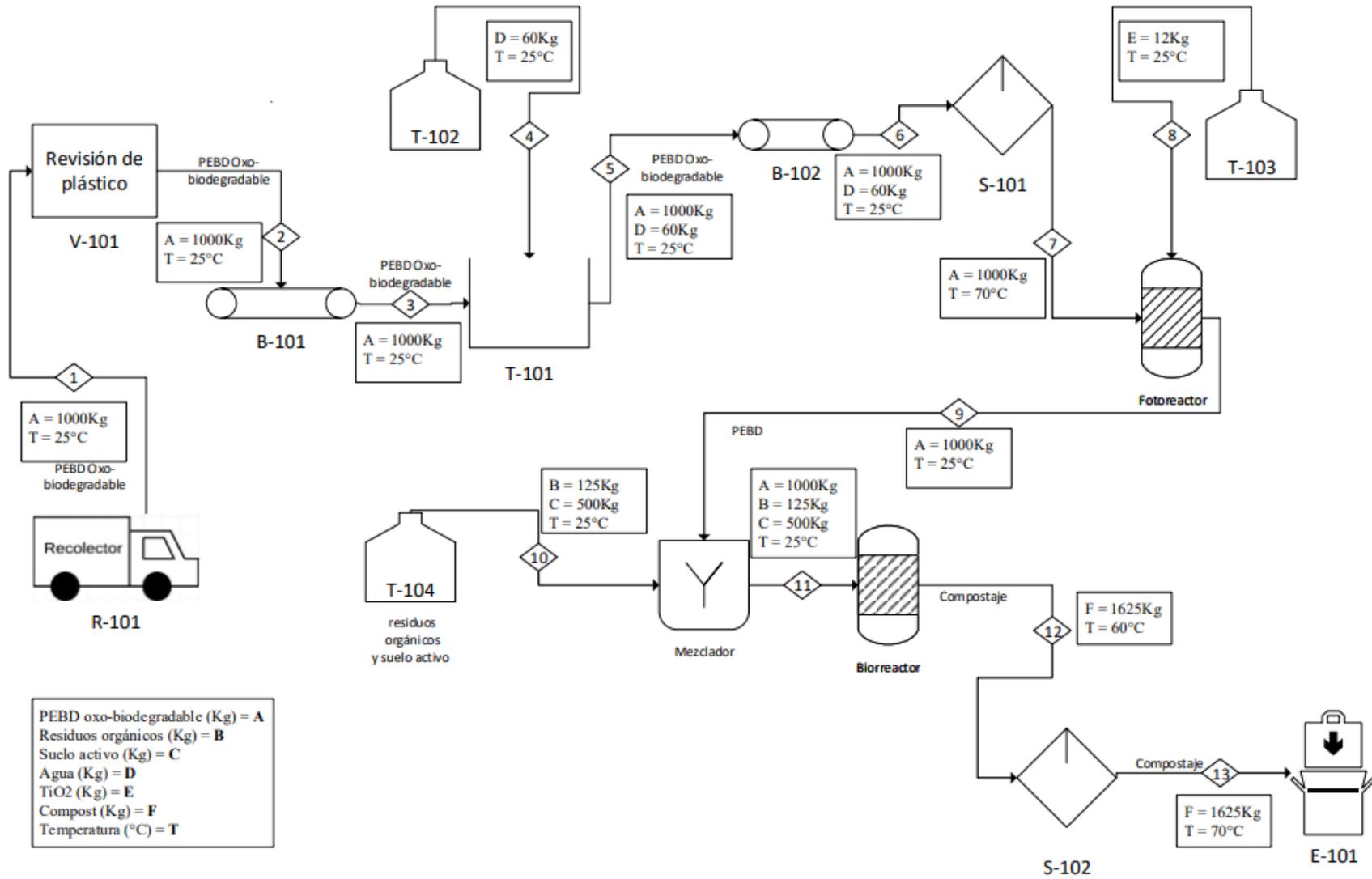
Figura 6.

Diagrama de bloques del proceso



Nota. Diagrama correspondiente a la producción de compostaje a partir de plástico oxo-biodegradable.

Figura 7.
Diagrama de flujo del proceso



Nota: Diagrama PFD correspondiente a la producción de compostaje a partir de plástico oxo-biodegradable.

Tabla 5.*Descripción de equipos*

ID	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
R-101	Recolección	Se recolecta el plástico para traerlo al lugar donde se empezará a realizar su respectivo proceso de compostaje.
V-101	Revisión	Se realiza una respectiva revisión del sello d2w para comprobar que este es el plástico recolectado.
T-101	Limpieza por aspersion	Pretratamiento de limpieza al plástico PEBD oxo-biodegradable.
S-101	Horno de secado	Se realiza un proceso de secado enfocado a la cristalización del plástico, esto con el fin de someterlo a una condición de estrés clave; la temperatura.
F-101	Fotorreactor	Fotorreactor donde se genera el proceso de fotooxidación, para inducir la fragmentación del material plástico.
M-101	Tanque de mezcla	Tanque de mezcla donde se ponen en contacto residuos orgánicos junto con suelo biológicamente activo, y plástico desintegrado.
B-101	Biorreactor	Biorreactor donde ocurre el proceso de biodegradación.
S-102	Horno de secado	Horno de secado para garantizar la oxidación del carbono y a su vez retirar exceso de agua.
E-101	Empaquetado	Empaquetado de compostaje para su posterior uso.

Nota. Tabla de descripción de equipos con su respectivo ID.

Tabla 6.*Especificación y costo de equipos*

EQUIPOS	IMAGEN	COSTO	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES
Aspersor		\$240.990 [47]	Dispositivo mecánico mediante el cual el flujo de un líquido es presurizado y transformado se desplaza sobre una superficie en direcciones y velocidades similares. [48]	Presión: 14Kpa Temperatura: 25°C Fluido de servicio: Agua [49]
Horno de secado		\$10.397.097 [50]	Un horno de secado es diseñado para aplicar calor por un periodo prolongado de tiempo. [51]	Dimensiones: Ancho 285 mm fondo 326 mm alto 229 mm Peso: 4,0 Kg Voltaje: 110V – 120V Frecuencia: 50/60 Hz Consumo de energía: 1700 W Alcance de temperatura controlado: 150 – 500 °C [52]

Fotorreactor		\$18.429.637 [53]	Un fotorreactor es un sistema basado en una reacción química estimulada por la influencia de la luz. [54]	Uso de catalizador: Tio2 Longitud de onda: 240nm-260nm Uso de luz: U																																								
Tanque de mezcla		\$3.477.290 [55]	Un tanque de mezcla está diseñado especialmente para la mezcla de dos o más sustancias en una o varias fases de proceso. [56]	<table border="1" data-bbox="1398 548 1885 735"> <thead> <tr> <th>Tamaño</th> <th>Altura</th> <th>D.I.</th> <th>D.E.</th> <th>Capacidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5 Galones</td> <td>21"</td> <td>14"</td> <td>16"</td> <td>8.9 U.S. gal (34 litros)</td> </tr> <tr> <td>10 Galones</td> <td>27"</td> <td>14"</td> <td>16"</td> <td>12.9 U.S. gal (49 litros)</td> </tr> <tr> <td>15 Galones</td> <td>33"</td> <td>14"</td> <td>16"</td> <td>16.9 U.S. gal (64 litros)</td> </tr> <tr> <td>20 Galones</td> <td>39"</td> <td>14"</td> <td>16"</td> <td>20.91 U.S. gal (79 litros)</td> </tr> <tr> <td>30 Galones</td> <td>31"</td> <td>20"</td> <td>22.5"</td> <td>31.79 U.S. gal (121 litros)</td> </tr> <tr> <td>60 Galones</td> <td>39"</td> <td>24"</td> <td>27"</td> <td>61.45 U.S. gal (233 litros)</td> </tr> <tr> <td>80 Galones</td> <td>43"</td> <td>26"</td> <td>29"</td> <td>81.3 U.S. gal (308 litros)</td> </tr> </tbody> </table> <p>[57]</p>	Tamaño	Altura	D.I.	D.E.	Capacidad	5 Galones	21"	14"	16"	8.9 U.S. gal (34 litros)	10 Galones	27"	14"	16"	12.9 U.S. gal (49 litros)	15 Galones	33"	14"	16"	16.9 U.S. gal (64 litros)	20 Galones	39"	14"	16"	20.91 U.S. gal (79 litros)	30 Galones	31"	20"	22.5"	31.79 U.S. gal (121 litros)	60 Galones	39"	24"	27"	61.45 U.S. gal (233 litros)	80 Galones	43"	26"	29"	81.3 U.S. gal (308 litros)
Tamaño	Altura	D.I.	D.E.	Capacidad																																								
5 Galones	21"	14"	16"	8.9 U.S. gal (34 litros)																																								
10 Galones	27"	14"	16"	12.9 U.S. gal (49 litros)																																								
15 Galones	33"	14"	16"	16.9 U.S. gal (64 litros)																																								
20 Galones	39"	14"	16"	20.91 U.S. gal (79 litros)																																								
30 Galones	31"	20"	22.5"	31.79 U.S. gal (121 litros)																																								
60 Galones	39"	24"	27"	61.45 U.S. gal (233 litros)																																								
80 Galones	43"	26"	29"	81.3 U.S. gal (308 litros)																																								

<p>Biorreactor</p>		<p>\$17.386.450 [58]</p>	<p>Un biorreactor es un recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo; aquí se lleva un proceso químico con microorganismos. [59]</p>	<p>caudal fluido entrada (m³ /h) 10.4 Dqo entrada (mg/l) 9870 Dqo salida (mg/l) 1480 Temperatura operacion (°c) 80 Cantidad biogas producida (m³ /día) 1768.4 [60]</p>
<p>Empacadora</p>		<p>\$15.473.940 [61]</p>	<p>Una empacadora es capaz de sellar, empacar y dejar listo cualquier tipo de producto ya sea unitario o múltiple. [62]</p>	<p>Empaca entre 25 a 40 unidades por minuto; y su consumo es de 1.4 kw hora. Tamaño del empaque: mínimo 2 cm de ancho x 3 cm de largo; máximo 8 cm de ancho x 15 cm de largo. Tamaño del producto: altura máxima de 4 cm. [63]</p>

Nota. Tabla de especificaciones y costo de equipos.

Tabla 7.*Balace de masa*

BALANCE DE MASA													
COMPUESTOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
PEBD oxo-biodegradable (Kg)	1000	1000	1000	0	1000	1000	1000	0	1000	0	1000	0	0
Residuos orgánicos (Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	125	125	0	0
Suelo activo (Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	500	0	0
Agua (Kg)	0	0	0	60	60	60	0	0	0	0	0	0	0
TiO ₂ (Kg)	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0
Compost (Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1625	1625
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25	25	70	25	25	25	25	60	70
Total	1000	1000	1000	60	1060	1060	1000	12	1000	625	1625	1625	1625

Nota. Tabla de balance de masa y temperaturas por corriente.

El balance másico se presenta en la tabla número 6 con todas las corrientes numeradas según el diagrama de flujo. Parte de una base de cálculo en el cual se van a ingresar 1000Kg de materia prima, en este caso plástico oxo-biodegradable; de igual forma, se tomarán 500Kg de suelo activo y 125Kg de residuos orgánicos, esto se elige según teoría en dónde se debe tomar en cantidad la mitad de la materia prima para el suelo y un cuarto del suelo activo para los residuos orgánicos [43]. Así mismo se eligió la cantidad de catalizador, tomando como base datos experimentales encontrados [64] en dónde cada 2,5Kg de producto se deben ingresar 0,03Kg de catalizador; con esto, se realizó la analogía a nuestro propio proceso.

De esta manera, se representan todas las operaciones unitarias enfocadas a un proceso de producción de compost, tomando como referencia todo lo consultado en objetivos anteriores y optando por la mejor configuración posible para realizar un adecuado proceso de degradación del plástico oxo-biodegradable.

4.1 Análisis económico

A continuación, se evalúan todas las ventajas que tiene el realizar este proyecto con respecto al PEBD tradicional que deja de utilizarse y al aprovechamiento que se le da al PEBD oxo-biodegradable, cabe resaltar que no se evalúa una tasa de retorno del proyecto o se calculan los costos base del mismo.

En primer lugar, resaltaremos que las bolsas blancas de PEBD tradicional tienen un costo de \$6.500 [65], aclarando que vienen 90 bolsas en total aproximadamente y tienen un tamaño de 18x30 pulgadas; por el contrario las bolsas plásticas oxo-biodegradables en su misma cantidad y tamaño tienen un costo de \$17.400, casi el triple de las tradicionales, cabe resaltar; según lo explican las normas que rigen este tipo de bolsas son pro ambientales, un punto a favor del costo que estas tienen.

En segundo lugar, se deben tener en cuenta los costos de las máquinas utilizadas en el proceso de compost, aunque ya sabemos que las bolsas plásticas oxo-biodegradables son más caras que las tradicionales, se les dará un valor agregado mediante la producción de compost con las mismas; lo importante en este proceso es conocer los costos de los equipos y dar un aproximado de la materia prima que se utilizará.

Teniendo esto presente, se realizó el cálculo económico de la siguiente manera; si partimos de Colombia, sabemos que hay una proyección de 5.970.956 adultos para el 2018 [66] en donde a partir si solo el 5% de este valor quieren adquirir bolsas oxo-biodegradables, tendremos que 298.548 adultos aproximadamente que comprarán este tipo de bolsas. Además de esto cabe resaltar una persona adquiere aproximadamente 6 bolsas a la semana [67], lo que traduce en 24 bolsas al mes por persona.

En resumen, obtendremos para poder reciclar y utilizar como materia prima por semana 1.791.288 bolsas; este dato lo obtenemos de la siguiente forma:

$$298.548 \text{ Adultos} * 6 \text{ Bolsas semanales} = 1.791.288 \text{ Bolsas}$$

También, según el balance másico, sabemos que con 1000Kg de bolsas PEBD oxo-biodegradables produciremos 1625Kg de compost y revisando el mercado colombiano 15Kg de compost orgánico o natural cuestan \$20.000 [68], esto quiere decir que tenemos 108 empaques de compost para vender, un producido neto a partir de 1000Kg de PEBD oxo-biodegradable del cuál se obtienen \$2.160.000, un activo bastante rentable y adecuado para llevar el proceso a cabo.

4.2 Análisis ambiental

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la creciente problemática ambiental respecto a la acumulación de microplástico en ecosistemas marítimos y acuáticos y el mal manejo de residuos provenientes de plástico, evidencio la necesidad de realizar un proceso en donde se consideren este tipo de desechos como recursos es decir que correspondan a ser la materia prima principal del proceso para la obtención del compostaje de tipo industrial. Dicho de otro modo el compostaje es considerado como una técnica de remediación gracias a los beneficios que se buscan obtener con esta, la cual buscan dar solución al tratamiento de residuos adecuado y mitigar la contaminación producida por estos debido a su acumulación, sin embargo pese a que esta tecnología tuvo sus inicios en el año 1980, hoy en día es posible evidenciar la necesidad de desarrollar procesos que fomenten esta técnica, donde sea posible la incrementación la industria del compostaje teniendo en cuenta tanto la gestión de los diferentes residuos, de esta manera hacer uso sostenible de estos [69]. Si bien es necesario considerar que para llevar a cabo el compostaje de tipo industrial se requiere de una inversión para su funcionamiento, los resultados a largo plazo en comparación con el compostaje domestico son considerablemente superiores, ya que el primero mencionado al tener la

capacidad de procesar mayor volumen de residuos orgánicos y a su vez garantizar que el tiempo en que este proceso finaliza no se ve afectado por factores externos como cambios en las condiciones climáticas y demás variables que interfieren en el proceso, resulta mucho más beneficioso en comparación de realizar el compostaje doméstico, el cual este último es recomendable para personas que quieran realizarlo de manera voluntaria. Y aunque este no representa resultados a corto plazo, se considera que a largo plazo este tipo de actividades hacen la diferencia, gracias a la conciencia ciudadana que se espera fomenta día a día [5].

Adicionalmente, este tipo de compostaje correspondería a ser una alternativa para disminuir el uso de fertilizantes químicos y a su vez para incrementar la fertilidad del suelo, ya que al ser proveniente de recursos orgánicos se producen efectos agro-biológicos, es decir que el desarrollo y crecimiento de la planta se ven favorecidos puesto que se evitan los efectos nocivos de los productos químicos al no hacer uso de estos. De modo que se considera otra ventaja adicional el hacer uso de compostaje proveniente únicamente de residuos orgánicos verificados y separados debidamente con antelación, y así promover el tratamiento de suelos de forma práctica e integra.

Por otro lado, en la descripción del proceso en el capítulo anterior se menciona que para la obtención del compostaje se hace uso únicamente de plástico oxo-biodegradable y residuos orgánicos específicamente cascaras de frutas. Ya que esto es fundamental para llevar a cabo el proceso de biodegradación de toda la materia prima que ingresa al proceso, de esta manera para garantizar la obtención de un compostaje de calidad es necesario verificar el origen de residuos orgánicos provenientes antes del empezar el proceso, no obstante es necesario que en el proceso, en la etapa llevada a cabo en el biorreactor se cumpla con llevar a cabo las 4 etapas que corresponden a la obtención del compostaje maduro, el cual cumple con todas las características fisicoquímicas para hacer uso de este como fertilizante.

Para finalizar se presenta otra ventaja la cual corresponde a ser que al hacer uso de residuos orgánicos y de plástico oxo-biodegradable como fuente principal, la presencia de estos en rellenos sanitarios disminuiría considerablemente por ende las emisiones y olores tóxicos desprendidos al ser estos descompuestos en estas zonas disminuirían también, lo cual se traduce en una mejora en la calidad del aire, especialmente para las zonas cercanas donde se encuentran situados los rellenos sanitarios, donde los afectados son los habitantes que residen cerca en donde se encuentran situados los vertederos en Colombia.

5. CONCLUSIONES

Se encontraron falencias en la normatividad colombiana al evaluar normas nacionales e internacionales frente al plástico oxo-biodegradable y demás plásticos conocidos actualmente, así mismo el país sigue optando por producir PEBD tradicional sin mitigar adecuadamente los daños ambientales ocasionadas por el mismo.

De acuerdo con el análisis de las normas principales por las cuales se soporta la empresa productora del PEBD oxo-biodegradable y de la tecnología d2w; se demostró la necesidad de realizar pruebas adicionales al plástico oxo-biodegradable para verificar que no produce microplástico luego de su biodegradación.

Las pruebas ASTM encargadas de determinar el porcentaje de biodegradación de los plásticos oxo-biodegradables, suponen condiciones controladas a nivel de laboratorio, por lo que no es posible garantizar su efectividad en condiciones ambientales donde variables como temperatura, pH, entre otras no son ser monitoreadas constantemente.

Para llevar a cabo el proceso de biodegradación en plásticos oxo-biodegradables satisfactoriamente se evidencio la necesidad de recurrir a operaciones unitarias, y así garantizar un porcentaje de al menos el 80% de biodegradación del plástico oxo-biodegradable.

Para que el proceso de biodegradación del plástico oxo-biodegradable sea llevado a cabo correctamente en el biorreactor, es necesario realizar previamente un proceso de descomposición por medio de fotocátalisis, haciendo uso de un fotorreactor con catalizador TiO_2 , degradando parcialmente el plástico oxo-biodegradable y aumentado sus condiciones de estrés.

La obtención del compostaje corresponde a ser del tipo industrial, ya que garantiza condiciones óptimas para la maduración de este por medio de la actividad microbiana y hacer uso de este con un valor agregado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Tecnología biodegradable científicamente comprobada*, Symphony environmental.
- [2] S. Salem, H. Sultan y H. Karam, *Determination of biodegradation rate of commercial oxo-biodegradable polyethylene film products using ASTM D 5988*, Kuwait: Journal of Polymer Research, 2019.
- [3] *Tecnología del control de vida del plástico*, Symphony environmental.
- [4] *The Science of the total environment*, vol. 703.
- [5] C. Bastioli, *Handbook of biodegradable polymers*, Second edition ed., England: Smithers Rapra, 2014.
- [6] L. Ivonne, M. Verónica, B. Carlos, P. Sergio, B. Lina y L. Violeta, «OXIDACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA,» *Avances en ciencia e ingeniería*, vol. 2, p. 17, 2011.
- [7] B. P. BUSTAMANTE, «LA DEGRADACIÓN DE LOS PLÁSTICOS,» *Universidad Eafit*, vol. 1, p. 20, 2009.
- [8] J. Alvarez, *Biodegradation : Properties, Analysis and Performance*, N. S. Publishers, Ed., New York : Hauppauge, 2016.
- [9] *La nueva economía del plástico replanteamiento del futuro del plástico*, Asociación de plásticos oxo-biodegradables.
- [10] Nalco Water, an Ecolab Company, *Nalco Water Handbook Principles of Biological Waste Treatment*, Nalco Water Handbook, Fourth Edition, 2018.
- [11] R. D. COLOMBIA, *Resolución Número 0000683*, 2012.
- [12] R. D. COLOMBIA, *Resolución 1407*, 2018.
- [13] R. D. COLOMBIA, *Decreto 2198*, 2017.
- [14] I. 17556, *Determination the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of carbon dioxide evolved*, Suiza, 2019.
- [15] A. D6954-18, *Exposing and testing plastics that degrade in the environment by a combination of oxidation and biodegradation*, 2018.

- [16] A. D5208-14, *Standard practice for fluorescent ultraviolet (UV) exposure of photodegradable plastics*, West Conshohocken, 2014.
- [17] A. D882-18, *Standart test method for tensile propierties of thin plastic sheeting*, United States, 2018.
- [18] A. D4329-13, *Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics*, United states, 2013.
- [19] A. D5870-16, *Standard Practice for Calculating Property Retention Index of Plastics*, United States, 2016.
- [20] A. G151-19, *Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources*, United States, 2019.
- [21] A. D618-13, *Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing*, United States, 2013.
- [22] A. D5032-19, *Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Glycerin Solutions*, United States, 2019.
- [23] A. D883-20a, *Standard Terminology Relating to Plastics*, United States, 2020.
- [24] A. G141-09, *Standard Guide for Addressing Variability in Exposure Testing of Nonmetallic Materials*, United States, 2013.
- [25] A. G7-13, *Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials*, United States, 2013.
- [26] A. G24-13, *Standard Practice for Conducting Exposures to Daylight Filtered Through Glass*, United States , 2013.
- [27] A. D5071-06, *Standard Practice for Exposure of Photodegradable Plastics in a Xenon Arc Apparatus1*, United States, 2013.
- [28] A. D2565-16, *Standard Practice for Xenon-Arc Exposure of Plastics Intended for Outdoor Applications*, United States, 2016.
- [29] A. G155-13, *Standard Practice for Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials*, United States, 2013.
- [30] A. D6400-19, *Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities*, United States, 2019.

- [31] A. D5338-15, *Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures*, United States, 2015.
- [32] A. D5988-18, *Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil*, United States, 2018.
- [33] S. environmental, «Reporte especial de la tecnología del control de vida del plástico oxo-biodegradable,» Reino Unido, 2018.
- [34] A. Retail, «La Verdad De Las Bolsas Oxo "Biodegradables",» p. 1, 21 Enero 2013.
- [35] J. Pereira y J. Bolin, *Composting: Processing, Materials and Approaches*, N. S. P. Hauppauge, Ed., New York, 2009.
- [36] A. D425-17, *Standard test method for centrifuge moisture equivalent of soils*, United States, 2017.
- [37] A. D6836-16, *Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge*, United States, 2016.
- [38] A. D4129-20, *Standard Test Method for Total and Organic Carbon in Water by High Temperature Oxidation and by Coulometric Detection*, United States, 2020.
- [39] M. K. Schult, S. Biegalski y K. Inn, *Optimizing the removal of carbon phases in soils and sediments for*, Tallahassee: National Institute of Standards and Technology, Analytical Chemistry Division, 1999.
- [40] N. Manivasakam, *Treatment of Textile Processing Effluents*, Chemical Publishing Company Inc, 2013.
- [41] A. E260-19, *Standard Practice for Packed Column Gas Chromatography*, United States, 2019.
- [42] *Cromatografía de gases*, Madrid: Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- [43] D. A. Streitwieser, «Estudio comparativo de la compostabilidad de fundas plásticas de PEBD, oxo-biodegradables y de papel distribuidas en el distrito metropolitano de quitó,» *Reserch Gate*, vol. 1, nº 1, p. 11, 2015.

- [44] ASIOBIOCOM, «Asociación española de plásticos biodegradables compostables,» 01 01 2019. [En línea]. Available: <https://www.asobiocom.es/compostaje/>. [Último acceso: 13 11 2020].
- [45] C.Y.Torres.L, *Fotocatálisis en nanotubos metaestables de TiO2 sobre electrodos de Ti para la degradación de naranja de metilo*, Querétaro, México: Ingenierías, 2013.
- [46] C. Ramos Alvariño, «Residuos orgánicos de origen urbano e industrial que se incorporan al suelo como alternativa económica en la agricultura,» *CENIC*, vol. 36, n° 1, p. 10, 2005.
- [47] Rociador, «Mercado Libre,» Tienda Todo, [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-512397120-rociador-oscilante-aspersor-riego-cesped-agricola-jardin-_JM#position=4&type=item&tracking_id=1bf73f9d-7ea9-4eb8-ac5f-3cc117c74be6. [Último acceso: 12 01 2021].
- [48] L. y. Aceros, «Láminas y Aceros,» 1 01 2015. [En línea]. Available: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/tipos-de-aspersores-y-sus-caracteristicas>. [Último acceso: 11 01 2021].
- [49] Rainbird, «Rainbird,» [En línea]. Available: http://www.rainbird.com.mx/documents/impact_sp.pdf. [Último acceso: 14 01 2021].
- [50] K. Yunboshi, «Alibaba,» [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-hot-air-circulating-laboratory-drying-oven-60485141327.html?spm=a2700.8699010.normalList.5.410331b5QjaGBt&s=p>. [Último acceso: 11 01 2021].
- [51] POWDERTRONIC, «POWDERTRONIC,» [En línea]. Available: <https://powdertronic.com/horno-de-secado/#:~:text=Un%20horno%20de%20secado%20es,2%20Secado%20de%20resinas>. [Último acceso: 11 01 2021].
- [52] Terlab, «Terlab,» [En línea]. Available: <http://www.felisa.com.mx/uploads/b781d014467797c94f629049d6bbadbb.pdf>. [Último acceso: 14 01 2021].
- [53] X. Instrument, «Alibaba,» [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/brand-new-quartz-photocatalytic-reactor-with-uv-lamp-xenon-lamp->

- 60686787624.html?spm=a2700.8699010.normalList.25.67465565pCjmZV. [Último acceso: 11 01 2021].
- [54] R. A. d. Ingeniería, «Real Academia de Ingeniería,» [En línea]. Available: <http://diccionario.raing.es/es/lema/fotorreactor#:~:text=Definici%C3%B3n%3A,para%20tratamiento%20de%20aguas..> [Último acceso: 11 01 2021].
- [55] N. Rong, «Alibaba,» [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/mixing-tank-with-agitator-price-of-mixing-tank-electric-heating-mixing-tank-60606028663.html?spm=a2700.8699010.videoBannerStyleB_top.5.15407cab24gfk2. [Último acceso: 11 01 2021].
- [56] Intranox, «Intranox,» [En línea]. Available: <https://www.intranox.com/tanques-de-almacenamiento/tanques-de-mezcla#:~:text=Los%20tanques%20de%20mezcla%20o,tanques%20reactores%20o%20deposito%20reactor..> [Último acceso: 11 01 2021].
- [57] T. d. mezcla, «AUTOQUIP,» [En línea]. Available: <http://aqautomation.com/wp-content/uploads/2017/05/mix-tanks-final-esp-1.pdf>. [Último acceso: 14 01 2021].
- [58] W. Y. Machine, «Alibaba,» [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/small-bioreactor-62346706360.html?spm=a2700.8699010.normalList.43.be7e2618lhkT2q>. [Último acceso: 11 01 2021].
- [59] Bioingeniería, «BIORREACTORES Y SU APLICACIÓN,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion>. [Último acceso: 11 01 2021].
- [60] F. Company, «Diseño de plantas productivas,» [En línea]. Available: https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/168367/TFG_FormicCompany_v02.pdf. [Último acceso: 14 01 2021].
- [61] G. Machinery, «Alibaba,» [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/sanko-packaging-machine-japan-sand-packing-packer-62421192167.html>. [Último acceso: 11 01 2021].

- [62] L. EQUIPOS, «MAQUINAS EMPACADORAS,» [En línea]. Available: <https://lactoequipos.wordpress.com/2017/11/12/maquinas-empacadoras/>. [Último acceso: 11 01 2021].
- [63] C. d. empaque, «Catálogo del empaque,» [En línea]. Available: <https://www.catalogodelempaque.com/ficha-producto/Empacadoras-de-alimentos+120477#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%20principales%3A&text=Formador%20universal%20en%20acero%20inoxidable,x%2015%20cm%20de%20largo..> [Último acceso: 14 01 2021].
- [64] L. D. G. Méndez, *Transformación física, química y microbiológica de polietileno de baja densidad (PEBD) empleando plasma de Oxígeno, fotocatalisis TiO2/UV y Pleurotus ostreatus*, Bogotá, Colombia, 2018, 12.
- [65] Multidesechables, «Multidesechables,» Multidesechables del norte, [En línea]. Available: <https://multidesechables.com/producto/bolsas-plasticas-transparentes-y-blancas/#:~:text=Bolsas%20pl%C3%A1sticas%20blancas%20y%20transparentes.&text=18%20x%2030%20Blancas%20%24%206.500,%24%207.500..> [Último acceso: 2 1 2021].
- [66] M. d. Salud, «Minsalud,» [En línea]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/PS/sala-situacional-poblacion-adulta-mayor.pdf>. [Último acceso: 14 01 2021].
- [67] G. Peace, «Greenpeace,» [En línea]. Available: http://greenpeace.co/pdf/reporte_plasticos.pdf. [Último acceso: 14 01 2021].
- [68] Lombritenjo, «Mercado Libre,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-567323646-humus-abono-organico-x-15-kgtierra-x-15-kgperlita-sustrato-_JM#position=10&type=item&tracking_id=4ceb1c02-b37b-4921-b677-1f2bee29099b. [Último acceso: 17 01 2021].
- [69] J. Bolin y J. Pereira, *Composting: Processing, Materials and Approaches*, New York: NOVA, 2009.
- [70] Á. R. y. H. Álvarez, «Escalamiento de procesos químicos y bioquímicos basado en un modelo fenomenológico,» *Información tecnológica*, vol. 22, n° 6, p. 20, 2011.

- [71] J. Vives , *Manual de tecnicas analiticas para la determinacion de parametros fisicoquimicos y contaminantes marinos: aguas, sedimentos y organismos*, Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR, 2003.
- [72] A. D5588-18, *Standar test method for determining aerobic biodegradation of plastic materials in soil*, United States, 2018.
- [73] A. D5526-18, *Standard Test Method for Determining Anaerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Accelerated Landfill Conditions*, United States, 2018.
- [74] A. D5338-15, *Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures*, United States, 2015.
- [75] A. D3590-17, *Standard Test Methods for Total Kjeldahl Nitrogen in Water*, United States, 2017.
- [76] A. D2974-20, *Standard Test Methods for Determining the Water (Moisture) Content, Ash Content, and Organic Material of Peat and Other Organic Soils*, United States, 2020.
- [77] A. D2908-17, *Standard Practice for Measuring Volatile Organic Matter in Water by Aqueous-Injection Gas Chromatography*, United States, 2017.
- [78] A. D2488-17, *Standard Practice for Description and Identification of Soils*, United States, 2017.
- [79] A. D2216-19, *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, United States, 2019.
- [80] A. D1293-18, *Standard test methods for pH of water*, United States, 2018.
- [81] *Analysis of the Possibility of Environmental Pollution by Composted Biodegradable and Oxo-Biodegradable Plastics*.

GLOSARIO

Biodegradación: es el proceso descomposición natural y no contaminante de una sustancia o producto por la acción de agentes biológicos.

Biorreactor: recipiente con condiciones controladas, adecuadas para el crecimiento del microorganismo que se cultiva.

Compostaje: técnica encargada de reciclar residuos orgánicos por medio del proceso de biotransformación de la materia orgánica para obtener abono.

Fotocatálisis: es un principio basado en reacciones redox, el cual tiene aplicación en la degradación de diferentes moléculas y otras aplicaciones industriales las cuales sirven para acelerar la degradación o el proceso que se desee.

Fotorreactor: equipo basado en una reacción química acelerada el cuál es el recipiente en donde se producirá una estimulación por la influencia de la luz y un catalizador.

Microplástico: piezas de plástico de bajo peso molecular, originados en procesos industriales y degradación insuficiente de plásticos.

Plástico Oxo-biodegradable: plástico degradable en el cual posee un aditivo pro-oxidante el cual favorece la degradación mediante luz UV y oxígeno.

Vertedero: lugar donde se vierte basuras, residuos o escombros, tales como rellenos sanitarios.

ANEXOS

ANEXO 1.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que si se desea realizar una fase experimental con el PEBD oxo-biodegradable, se proceda formulando un diseño experimental 2^2 , este diseño se propone debido a que se obtienen la cantidad de datos adecuados sin demasiadas réplicas y se consigue hacer un análisis correcto de las muestras que se tienen logrando reducir el margen de error sin tener extensos procedimientos por realizar.

Se debe hacer un análisis experimental mediante el uso tanto de luz UV como de calor y comparar el porcentaje de degradación obtenido en cada uno, para corroborar que condición de estrés funciona mejor para inducir la degradación.

Se recomienda utilizar el catalizador de dióxido de titanio (TiO_2) mezcla rutilo-anatasa al 99,5% ya que este es el recomendado y el que mejor funciona en la degradación mediante fotocatalisis.

Se recomienda diseñar un proceso degradativo a nivel acuático para revisar con mayor profundidad todas las normas que rodean el proceso de degradación en este ambiente, con el fin de continuar estudiando más los plásticos oxo -biodegradables.

Para este trabajo se utilizó un escalamiento teórico sin ningún tipo de heurística, sin embargo; se recomiendo utilizar la matriz de Hankel para el control del escalamiento de procesos químicos a nivel industrial [70], esto es sugerido a partir de un modelo fenomenológico y sirve partiendo tanto de datos teóricos como de laboratorio.