

Estudio comparativo de la compostabilidad de fundas plásticas de PEBD, oxo-biodegradables y de papel distribuidas en el Distrito Metropolitano de Quito

Tzu Hsin Huang¹ y Daniela Almeida Streitwieser^{1*}

¹Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingenierías - El Politécnico, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas, Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica, Campus Cumbayá, Casilla Postal: 17-1200-841, Quito-Ecuador.

*Autor principal/Corresponding author, correo electrónico: dalmeida@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/02/20. Aceptado/Accepted: 2015/05/08.

Publicado en línea/Published online: 2015/05/22. Impreso/Printed: 2015/06/01.

Comparative study of the compostability of LDPE, oxo-biodegradable and paper bags distributed in Distrito Metropolitano de Quito

Abstract

In this study the degradation behavior of different types of commercial T - type bags has been investigated. The bags tested according to their commercial description are: LDPE plastic, oxo-biodegradable plastic and paper. The investigation was performed over a period of 32 weeks under real conditions. The composting essays were inoculated with fresh commercial humus and the humidity was controlled over the complete period, while the temperature was kept at the low mesophilic regime at room temperature, without direct contact to sunlight. The determination of the degradation was based on the analyses of total solids and organic total solids, as well as visual observations.

The results show that only the paper bags were biodegraded appropriately, leaving no residue after 32 weeks. While neither the LDPE nor the oxo-biodegradable plastic bags show any signs of disintegration or degradation over the entire period. These results were expected for the LDPE bags, but not for the oxo-biodegradable plastics. As conclusion the low biodegradability of these bags is explained by the fact that even if the bags are commercially distributed as biodegradables, they are normal LDPE bags with an oxo - additive. Actually, according to the definition, they cannot be considered as biodegradable, since they can only be degraded by few microorganisms in a very slow rate. The degradation of their chemical structure occur by the action of heat or ultraviolet light. And since non of these conditions were found during this investigation, the bags suffer no disintegration.

Keywords. Oxo-degradable plastics, plastic bags, biodegradable bags, paper bags, composting, biodegradation, compostability.

Resumen

En esta investigación se estudia la degradación de los diferentes tipos de fundas comerciales tipo - T. Las fundas investigadas conforme a su descripción comercial son: de plásticos PEBD, de plásticos oxo-biodegradables y de papel. La investigación se realizó durante un periodo de 32 semanas bajo condiciones reales. Los ensayos del compostaje fueron inoculados con humus comercial fresco y la humedad se controló durante el periodo completo, mientras que la temperatura se mantuvo en el bajo régimen mesofílico a temperatura ambiente, sin contacto directo a la luz solar. La determinación de la degradación se basó en los análisis de los sólidos totales y sólidos orgánicos, como también observaciones visuales.

Los resultados muestran que solo las fundas de papel fueron biodegradadas adecuadamente, al no dejar residuos después de 32 semanas. Mientras que ni las fundas plásticas PEBD ni las oxo-biodegradables mostraron señales de desintegración o degradación durante la investigación. Estos resultados fueron esperados de las fundas PEBD, pero no para las fundas oxo-biodegradables. La baja biodegradabilidad de estas fundas se explica por el hecho de que si bien las fundas son distribuidas como biodegradables, son fundas normales de PEBD con un aditivo pro-oxidante. De acuerdo a la definición de biodegradabilidad, estas fundas no pueden ser consideradas como biodegradables, debido a que pueden ser degradadas por pocos microorganismos con tasas muy bajas. La degradación de sus estructuras químicas ocurre por la acción de calor o rayos ultravioletas. Y debido a que ninguna de estas condiciones fueron encontradas durante el experimento, las fundas no sufrieron desintegración a lo largo de esta investigación.

Palabras Clave. Plásticos oxo-biodegradables, fundas plásticas, fundas biodegradables, fundas de papel, compostaje, biodegradación, compostabilidad.

Introducción

El manejo de los desechos plásticos, en especial las fundas plásticas, es uno de los temas más discutidos en la actualidad [1]. Debido a su difícil degradación, la mayoría de las fundas plásticas terminan enterradas en vertederos o acumulándose en lugares remotos. Se ha establecido que los plásticos forman entre el 20 % al 30 % del volumen de los vertederos de los desechos municipales. Siendo que los plásticos son resistentes a la degradación bacteriana, permanecen por años bajo la tierra o contaminando ecosistemas, convirtiéndose en uno de los desechos más contaminantes y problemáticos [2]. Por esta razón, es importante buscar soluciones para eliminar estos desechos o encontrar otras técnicas para reemplazar el uso excesivo de las fundas plásticas que son difíciles de descomponer.

La palabra plástico viene de griego “plastikos” que significa apto para ser moldeado de diferentes formas [1]. Desde su descubrimiento en 1909 por Baekeland con la síntesis de la baquelita a partir de fenol y formaldehído, los plásticos han sido un producto muy útil y versátil [3]. Los plásticos son largas cadenas de polímeros sintetizados por el hombre. Principalmente están compuestos por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, cloruro, y bromuro. Normalmente, estos compuestos son extraídos del petróleo o del gas natural [1].

Debido a sus propiedades de moldeabilidad, durabilidad, rentabilidad y bajo costo, el plástico se ha convertido paulatinamente en un producto indispensable para la vida diaria [4]. Su desarrollo fue concebido para resistir la degradación. Es decir que no pueda ser descompuesto fácilmente por los microorganismos, los cuales pueden reducir el tamaño de los desechos orgánicos y así evitar su acumulación [5]. Sin embargo, debido a su amplio uso, los desechos sólidos formados de plásticos, y en especial fundas plásticas, se van acumulando en vertederos, ciudades, parques y hasta en los lugares más remotos como océanos. Esto está generando un gran impacto ambiental, ya que van ocupando espacios, disminuyendo la cantidad de tierra para otros usos, contaminando suelos y fuentes de agua, además de poner directamente en peligro a flora y fauna.

De acuerdo a estadísticas, en el año 2013 hubo una producción anual de 299 millones de toneladas de plásticos a nivel mundial [6]. En la Figura 1 se presenta la producción mundial desde el año 1950, con un crecimiento promedio anual de 8,7 % [6, 7]. De toda la cantidad fabricada de plásticos, 1000 toneladas son destinados a la producción de fundas plásticas [4].

Con el objetivo de disminuir los desechos producidos por el uso de los plásticos, se iniciaron investigaciones en el desarrollo de plásticos degradables. Esta idea surgió a finales de los años 80, cuando la degradabilidad y la conservación del medio ambiente empezaron a ser un tema de interés por científicos y la sociedad en general. Desde entonces se han investigado precursores químicos que puedan sustituir a los polímeros convencionales

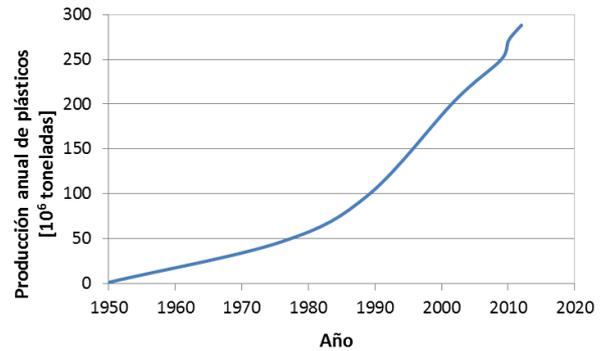


Figura 1: Producción mundial de los plásticos de 1950-2011 [6, 7].

[8]. Este nuevo tipo de plástico degradable puede ser descompuesto de manera más fácil debido a su estructura molecular que más adelante se tratará en detalle.

Comúnmente se utiliza arbitrariamente los términos desintegrar, degradar, biodegradar y compostar. Sin embargo, de acuerdo al estándar ASTM D5988-03 [9] y a la norma NTE INEN 2643:2012 [10], la biodegradabilidad se refiere a la capacidad de ser descompuesto en dióxido de carbono, agua, metano, compuestos inorgánicos o biomasa, debido a acciones enzimáticas de los microorganismos, sin dejar rastro de su composición original [11]. En consecuencia un plástico compostable o biodegradable es aquel que, al ser sometido a condiciones de compostaje, puede ser biodegradado por la acción biológica en dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa. Esta sustancia se conoce como humus o compost [11].

La degradación es la descomposición química de un material y la desintegración se refiere a la reducción o fragmentación de un material a partículas más pequeñas. Para que una bolsa cumpla con el estándar de degradabilidad, se requiere que su descomposición alcance un grado del 60 % al 90 % dentro de un rango de 60 a 180 días en un ambiente de compostaje [5]. Otro método de reducir el uso de las fundas plásticas es utilizar las fundas de papel que se basan en fibras naturales donde sus moléculas son fáciles de degradar por microorganismos [7].

El compostaje es un proceso que controla la descomposición biológica y la transformación de los materiales biodegradables en compost, una sustancia similar al humus rica en carbono orgánico así como micro- y macronutrientes [1]. En este medio, los microorganismos conformados por bacterias y hongos pueden romper fácilmente las largas cadenas de polímeros formando desechos orgánicos no contaminantes, dióxido de carbono, minerales, y agua [12].

Otros beneficios de utilizar el compostaje para degradar desechos es que la inversión es baja, no tiene una alta demanda energética, y el producto puede utilizarse como abonos para la agricultura [13].

Este trabajo consiste en la comparación del tiempo de degradación de las fundas comerciales de papel, plásti-

Tipo de Plástico	Estructura	Uso
Polietileno (PE)	$[-CH_2-CH_2-]_n$	Fundas plásticas, botellas, empaques, juguetes, tubos de irrigación.
Polipropileno (PP)	$[-CH(CH_3)-CH_2-]_n$	Tapas de botellas, sorbetes, asientos de automóviles, baterías de automóviles, alfombras.
Poliestireno (PS)	$[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_n$	Vasos desechables, materiales de empaque.
Cloruro de polivinilo (PVC)	$[-CH_2-CH(Cl)-]_n$	Cubierta de asientos en automóviles, cortinas de ducha, botellas, tubos eléctricos.
Poliuretano (PUR)	$[-R-O-C(=O)-NH-R_2-NH-C(=O)-O-]_n$	Neumáticos, empaques, parachoques, aislantes en refrigeradores, esponjas, chalecos salvavidas.
(Poli(etileno tereftalato) (PET)	$[-CH_2-CH_2-O-C(=O)-C_6H_4-C(=O)-O-]_n$	Botellas, empaques de carnes, fibras textiles.
Poli(butileno tereftalato) (PBT)	$[-O-C_6H_4-C(=O)-(CH_2)_4-C(=O)-O-]_n$	Aislante eléctrico, interruptores, capacitores, conectores, fibras, espejos retrovisores.

Tabla 1: Estructura molecular y usos de los tipos de plásticos más comunes [1].

cas y llamadas “biodegradables”, bajo condiciones reales de compostaje similares a las que se encuentran en vertederos sanitarios, donde principalmente son enviadas las fundas después de su uso. En esta investigación se desea investigar si las fundas comercializadas como “biodegradables” pueden ser descompuestas más rápida y fácilmente que las fundas plásticas convencionales, como se esperaba; por lo cual se sometieron a los tres tipos de fundas: plásticas, biodegradables y papel, en un medio de compostaje bajo condiciones aeróbicas.

Características y propiedades de las fundas

Fundas plásticas

El polímero sintético más utilizado para la producción de las fundas plásticas es extraído del petróleo. Se estima que se utilizan a nivel mundial casi dos millones de fundas plásticas por minuto [14]. Los tipos de plásticos más aplicados en los empaques son: polietileno (PEBD, PEAD, PEMD), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano (PUR), tereftalato de polietileno (PET), y tereftalato de polibutileno (PBT). En la Tabla 1 se presenta la estructura molecular y las principales aplicaciones de los diferentes plásticos [1].

El material más utilizado para la fabricación de las fundas plásticas es el polietileno debido a su alta resistencia, baja absorción de humedad, baja reactividad química, y bajo coeficiente de fricción [15]. Dependiendo de la densidad, el polietileno está clasificado en polietileno de alta densidad (PEAD), de baja densidad (PEBD), y de media densidad (PEMD) [1]. El PEAD es fabricado por un proceso de baja presión y está conformado por una larga cadena molecular con apenas una ramificación lateral por cada 200 átomos de carbono. Debido a su estructura lineal tiene alta cristalinidad y mayor fuerza intermolecular, lo cual ayuda a tener mejor rigidez y resistencia. La mayoría del PEAD es utilizado en la

fabricación de botellas para detergentes, envases de leche, juguetes, contenedores de basura y agua [15, 16]. El PEBD se fabrica por un proceso de polimerización de alta presión. Contrario al PEAD, este tipo de polietileno está formado por largas cadenas ramificadas. Debido a la presencia de las cadenas laterales, las moléculas no pueden ser aglomeradas fácilmente, presentando su característica de baja cristalinidad y tensión, siendo mucho más flexible que el PEAD. Por lo general, el PEBD es aplicado para materiales de embalaje, películas plásticas, y fundas plásticas [15, 16].

Al igual que el PEAD, el PEMD está hecho del mismo proceso de baja presión. Posee ciertas ramificaciones cortas en su estructura molecular. Estas pequeñas cadenas laterales lo hacen un poco más suave que el PEAD. Normalmente, son utilizados en la fabricación de tubos, sacos, películas de embalaje, y fundas de carga [15, 16].

En el 2012, 6.6 millones de toneladas de plásticos se reciclaron a nivel mundial [6].

Fundas biodegradables

Las fundas biodegradables parten de la misma estructura molecular que forman los plásticos, por lo que están constituidas por largas cadenas de polímeros. Sin embargo, estas cadenas están mezcladas con compuestos naturales de origen vegetal o aditivos que permiten tener cambios significativos en su estructura química. De esta manera, son susceptibles a los ataques de los microorganismos. Los polímeros biodegradables pueden ser clasificados en dos tipos: polímeros hidro - biodegradables y polímeros oxo - biodegradables [17].

Los polímeros hidro - biodegradables se biodegradan intrínsecamente. Es decir, su estructura química permite una degradación enzimática y, por lo general, son fabricados a partir de recursos renovables como almidón, celulosa, quitina, entre otras [17]. Por ejemplo, polihidroxialcanoatos (PHA), polihidroxibutirato, polilácticos o polisacáridos [1].

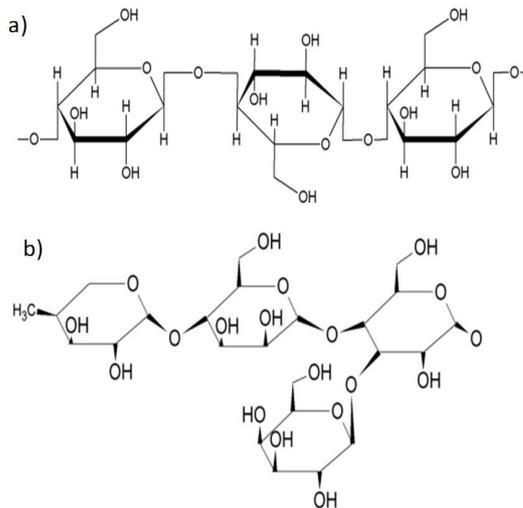


Figura 2: Estructura molecular de a) celulosa y b) hemicelulosa [21, 22].

Los polímeros oxo - biodegradables poseen compuestos pro - oxidantes o foto - sensibilizadores, por lo que al ser sometidos a luz ultravioleta o calor se produce fotooxidación y termoxidación, respectivamente. Estas oxidaciones ocasionan la degradación en los polímeros sintéticos, reduciendo su masa molar y formando grupos oxigenados que pueden ser metabolizados por los microorganismos [17]. Estos polímeros son formados por poliésteres, tales como policaprolactona, poliéster y copolímeros [1]. Estrictamente hablando estos polímeros deberían denominarse oxo-degradables, ya que su degradación no ocurre por acción enzimática.

La mayoría de las macromoléculas hidro-biodegradables, conocidas como biopolímeros, son sintetizadas por microorganismos. La mayoría de las moléculas oxo-biodegradables son biopolímeros sintéticos. Una combinación entre estas moléculas forma la estructura básica de los plásticos biodegradables. En las Tabla 2 y Tabla 3 se presentan las estructuras y las aplicaciones de los dos tipos de plásticos biodegradables [1, 18].

De todos estos compuestos, el más conocido e importante es el PHA, seguido por el PHB y el PHBV. Por su alta biodegradabilidad y biocompatibilidad, y dado que su materia prima consta de recursos renovables, son aplicados constantemente en los materiales de empaque, dispositivos médicos y productos de higiene personal [18].

Fundas de papel

El papel es producido por las fibras de madera que contienen principalmente celulosa (45 %), hemicelulosa (20 %) y lignina (35 %) [19], además de un alto porcentaje de papel reciclado. Desde el año 2000 hasta el 2010, el uso de papel reciclado para la fabricación de papel se ha incrementado en un 45.4 %. En el año 2012 hubo una producción de 212 millones de toneladas de papel reciclado [20].

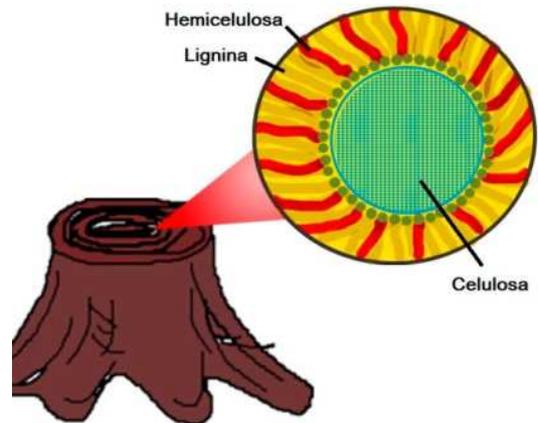


Figura 3: Lignina en la madera.

La celulosa es un carbohidrato sintetizado por las plantas. Es considerada el biopolímero natural más abundante y es el principal compuesto de los papeles. La molécula de la celulosa es un polímero lineal formado por glucosa en forma de piranosa y vinculado entre sí mediante el enlace 1,4-glicosídico. En la degradación de la celulosa ocurren dos reacciones: la hidrólisis del enlace glicosídico, en donde se separa el enlace que une las moléculas β -D-glucosa y la oxidación de los anillos glucopiranosos que permite separar las moléculas de glucosa del polímero de la glucosa [21]. La hemicelulosa está compuesta por polímeros de xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, y glucosa por enlaces beta 1-4 y alfa 1-3. Para su degradación se requiere de un complejo conjunto de enzimas que hidrolizan a los xilanos y glucomananos [22]. En la Figura 2 se presentan las moléculas de la celulosa y la hemicelulosa.

La lignina es un hetero-polímero fenólico racémico complejo que se encuentra en las paredes celulares de las plantas y es generada por polimerización oxidativa de tres alcoholes [23]. Este polímero es sumamente resistente frente a la biodegradación, es insoluble en ácidos y solo puede ser soluble en soluciones alcalinas fuertes como la sosa cáustica, por lo que, la lignina protege a la celulosa y hemicelulosa de la hidrólisis enzimática. En la Figura 3 se puede observar su ubicación en las plantas. Para la degradación de la lignina se requiere de un proceso oxidativo donde participan microorganismos como el hongo *Phanerochaete Chrysosporium*. También hay otros organismos como el *Actinomyces* que puede delignificar parcialmente la lignina para acceder a la celulosa [22].

Para la fabricación de las fundas de papel se utilizan numerosas especies de árboles. Sin embargo, por lo general se aplican coníferas, abetos y pinos. Además se obtienen celulosas del algodón, aserrín, astillas de madera y pajas de cereales. Muchos fabricantes combinan fibras recicladas y fibras nuevas de las maderas para obtener la calidad necesaria para la fabricación de las fundas de papel [24].

Tipo de plástico hidro-biodegradable	Estructura	Uso	Formación
Polihidroxialcanoatos (PHA)		Termoplásticos, empaques, dispositivos médicos.	Fermentación de azúcares o lípidos por <i>Alcaligenes Eutrophus</i> .
Polihidroxibutirato (PHB)		Botellas, fundas y películas de embalaje.	Fermentación de glucosa o almidón por <i>Azotobacter Chroococcum</i> .
Polihidroxivalerato (PHBV)		Recubrimientos de papel.	Derivado de PHB.
Ácido poliláctico (PLA)		Recubrimientos de papel, envases y empaques. Fundas de compostaje.	Fermentación de almidón de maíz con bacterias lácticas.

Tabla 2: Estructura molecular y usos de los tipos de plásticos hidro-biodegradables más comunes [1, 18].

Tipo de plástico oxo-biodegradable	Estructura	Uso	Formación
Policaprolactona (PCL)		Productos de agricultura, fibras, contenedores de semilla.	Polimerización de ε-caprolactona (anillo abierto).
Polibutileno succinato (PBS)		Empaques de alimentos, fibras, telas, vasos desechables, platos.	Policondensación de ácido succínico y butanodiol.
Alcohol polivinílico (PVOH)		Empaques, embolsados, desechables.	Alcoholólisis de acetato de polivinilo.
Acetato polovinílico (PVAc)		Adhesivos, fundas, empaques.	Polimerización del acetato de vinilo.

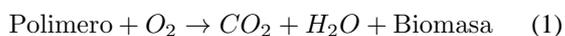
Tabla 3: Estructura molecular y usos de los tipos de plásticos oxo-biodegradables más comunes [1, 18].

Proceso de compostaje o biodegradación aeróbica

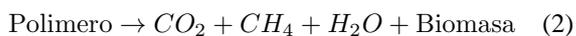
El compostaje es una descomposición aeróbica en donde participan restos orgánicos como vegetales, cáscaras de frutas, basuras, excrementos, etc. Este ambiente facilita el crecimiento de los microorganismos.

La biodegradación es definida como descomposición de materias orgánicas mediante microorganismos o sus enzimas en compuestos más pequeños como dióxido de carbono, metano, sólidos y agua. Compostaje es un tipo de biodegradación aeróbica que da como resultado la formación de gases como CO₂, CH₄ y N₂O, compost y agua debido a la metabolización de las bacterias sobre los materiales biodegradables [11].

La biodegradación aeróbica presenta la siguiente reacción [25]:



Mientras que una biodegradación anaeróbica presenta la reacción (2) [25]:



Las bacterias más importantes que participan en los procesos de biodegradación son: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Actinomyces*, *Nocardia*, *Streptomyces*, *Klebsiella*, *Thermoactinomyces*, *Micromonospora*, *Mycobacterium*, *Rhodococcus*, *Comamonas*, *Azotobacter* y *Alcaligenes*. Las

bacillus producen endosporas de pared gruesa que son resistentes al calor, a la radiación y a los químicos, lo cual las hace muy aptas a las condiciones críticas durante el proceso de compostaje [25].

Los hongos que actúan en el proceso de biodegradación son: *Talaromyces*, *Thielavia*, *Cladosporium*, *Chaetomium*, *Sporotrichum*, *Phanerochaete*, *Ganoderma*, *Paezilomyces*, *Thermoascus*, *Trametes*, *Phlebia*, *Penicillium*, *Aerobasidium*, *Candida*, *Geotrichum* y *Thielavia* [25].

En el compostaje la temperatura juega un papel muy importante para el crecimiento de los microorganismos. Además, se debe considerar la relación entre carbono y nitrógeno, y el valor de pH [25]. Por lo general, el compostaje se lleva a cabo bajo las siguientes condiciones: temperaturas altas hasta 58 °C, pH entre 7-9, condiciones aeróbicas, humedad del 50 % y una fuente de nutrientes para el crecimiento de los microorganismos dada a través de una relación de C/N entre 10-40 [1, 13, 26].

En los vertederos y rellenos sanitarios se lleva a cabo un proceso de compostaje de los desechos orgánicos biodegradables. Mientras que los desechos no biodegradables se van acumulando y permanecen inalterados hasta por cientos de años. Es por esta razón que el compostaje es uno de los métodos más relevantes en el tratamiento de los desechos de los plásticos biodegradables. La mayoría de las definiciones y los estándares sobre los plásticos biodegradables se basan en la compostabilidad de los mismos. El éxito de los plásticos biodegradables está determinado por su disponibilidad de compostaje y facilidad de degradación [27].



Figura 4: Ensayos del experimento.

Existen algunos estándares para definir si un material es considerado compostable. De acuerdo al estándar europeo EN 13432, para obtener el certificado de compostabilidad, el material debe ser sometido a pruebas. En donde dentro de 180 días, a una temperatura de 58°C, el material debe haber biodegradado el 90%. Además de esta biodegradación, el material también debe haberse liberado durante el proceso de compostaje de su toxicidad y efectos negativos [11, 28]. De acuerdo al estándar americano ASTM D6400-04, la biodegradación debe ser de 60% después de 180 días y se permite que el material contenga una mayor concentración de metales pesados [11, 29].

Para poder analizar la degradación realizada en el proceso de compostaje, se determina la cantidad de oxígeno consumido y la cantidad de dióxido de carbono producido. Bajo condiciones aeróbicas, los microbios usan oxígeno para oxidar el carbón, formando dióxido de carbono como uno de los principales productos del metabolismo [1].

Métodos experimentales

Preparación de los ensayos de compostaje

Los ensayos de compostaje fueron realizados en el Laboratorio de Desarrollo de Energía Alternativas de la Universidad San Francisco de Quito. Debido a que el compostaje es realizado por un conjunto de diferentes microorganismos, se debe mantener un medio óptimo para el crecimiento de los mismos. Es importante realizar los ensayos en lugares frescos y aireados, sin recibir la radiación directa del sol, ya que los ensayos se pueden secar demasiado y en consecuencia, matar a los microorganismos.

Para los ensayos de compostaje se mezclaron 7 kg de tierra negra y 7 kg de compost conocido como humus en el mercado local, en baldes de 200 L de capacidad. Cada balde tenía aproximadamente 14 kg de la mezcla de tierra y compost. Esta mezcla se considera el blanco. La tierra y el humus fueron obtenidas en el Comercial Kywi S.A. de la marca Rancho Alegre.

Para el experimento se utilizaron 6 ensayos. Cada muestra contenía diversas fundas cortadas en pequeños tamaños de forma irregular con dimensiones entre 4x4 cm² y 8x2 cm², con el objetivo de facilitar el volteo y mezclado de las muestras dentro de cada ensayo y facilitar la degradación por las acciones microbianas. Se utiliza

un ensayo de control blanco que contenía solo la mezcla del humus y tierra, y varios ensayos para los tres tipos de fundas: plásticas, biodegradables y de papel. En la Tabla 4 se muestra la composición inicial de cada ensayo. En la Figura 4 se pueden observar los 6 ensayos.

Para mantener las condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos, se tuvo que encontrar inicialmente el porcentaje de humedad adecuado para el proceso de compostaje. Se inició con un porcentaje de 60% de humedad, pero al ver que la mezcla estaba demasiado húmeda se redujo la humedad al 50%.

Control y caracterización de los ensayos

Para caracterizar los resultados de la degradación de los diferentes tipos de fundas, se realizaron análisis de sólidos totales y sólidos totales orgánicos.

Los sólidos totales dan información sobre el contenido de humedad en la muestra y sirven para conocer la cantidad de agua que se debe agregar para mantener las condiciones adecuadas para la biodegradación.

En cambio los sólidos totales orgánicos dan información del avance del proceso de degradación, ya que durante el compostaje se debe reducir el porcentaje de material orgánico en la muestra.

Análisis de sólidos totales

Los análisis fueron realizados por triplicado. Para el análisis de sólidos totales (TS) se siguió el siguiente procedimiento [30]:

Pesar los crisoles vacíos. Tomar 10 g de la muestra en una probeta para facilitar su medición del volumen. Colocar la muestra en el crisol. Secar las muestras a una temperatura de 105 °C dentro del crisol en una estufa por 24 horas. Retirar los crisoles y pesar las muestras secas. Para realizar los cálculos de los sólidos totales (TS) se aplica la siguiente ecuación [30].

$$TS = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \quad (3)$$

Donde, m_0 es el peso del crisol vacío en gramos, m_1 es el peso en gramos del crisol con la muestra, y m_2 es el peso en gramos del crisol con la muestra que sale de la estufa.

Análisis de sólidos totales orgánicos

No. de ensayo	Tipo de fundas	Cantidad de fundas		Cantidad de humus		Cantidad de tierra	
		[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
1	Blanco	0	0.00	7	50.00	7	50.00
2	Papel	0.5	3.45	7	48.28	7	48.28
3	Plástico PEBD 1	0.2	1.41	7	49.30	7	49.30
4	Plástico PEBD 2	0.2	1.41	7	49.30	7	49.30
5	Biodegradable 1	0.2	1.41	7	49.30	7	49.30
6	Biodegradable 2	0.2	1.41	7	49.30	7	49.30

Tabla 4: Composición de los ensayos en el experimento.

No. de ensayo	Tipo de bolsa	Peso del ensayo [kg]	TS [%]	Humedad [%]	oTS [%]	Muestra seca [kg]	Material orgánico [kg]
1	-	11.40	77.58	22.42	6.36	8.48	0.73
2	Papel	12.00	70.04	20.46	5.09	8.40	0.61
3	Plástico PEBD 1	12.00	70.12	23.24	7.98	8.41	0.96
4	Plástico PEBD 2	12.00	69.65	30.35	17.13	8.92	2.19
5	Biodegradable 1	10.50	79.32	20.68	6.77	8.33	0.71
6	Biodegradable 2	12.80	69.10	30.90	18.05	8.29	2.17

Tabla 5: Características iniciales del experimento de los diferentes ensayos.

Para el análisis de los sólidos totales orgánicos (oTS) se siguió el siguiente procedimiento [30]:

Calcinar los crisoles con la muestra seca en una mufla por 6 horas a una temperatura de 550 °C. Retirar los crisoles y pesar las muestras. Para realizar los cálculos de los sólidos orgánicos totales se aplica la siguiente ecuación [30].

$$TS = \frac{m_2 - m_3}{m_1 - m_0} \quad (4)$$

Donde, m_3 es el peso en gramos del crisol con la muestra que sale de la mufla.

Cálculos de los parámetros operacionales

Para determinar el porcentaje de humedad se aplicó la siguiente ecuación.

$$\% \text{Humedad} = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (5)$$

Para obtener la cantidad de agua evaporada y la cantidad de sólidos degradados semanalmente, se realizan balances de materia. Este cálculo se basa en el peso del ensayo en el primer día y el peso del ensayo después de 7 días. Para obtener la cantidad evaporada y degradada simplemente se multiplica por los respectivos porcentajes de sólidos totales y humedad, considerando la cantidad de agua añadida de acuerdo a las ecuaciones (5) y (6).

$$m_{H_2O, \text{evap}} = m_{H_2O, d1} + m_{H_2O, \text{added}} - m_{H_2O, d7} \quad (6)$$

Donde, $m_{H_2O, \text{evap}}$ es la cantidad de agua evaporada en una semana, $m_{H_2O, d1}$ y $m_{H_2O, d7}$ son la cantidad de agua en la muestra al inicio (día 1) y al final (día 7) del

intervalo, respectivamente. Y $m_{H_2O, \text{added}}$ es la cantidad de agua añadida al ensayo en esa semana.

$$m_{\text{degrad}} = m_{\text{seca, d1}} - m_{\text{seca, d7}} \quad (7)$$

Donde, m_{degrad} es la cantidad de materia degradada, $m_{\text{seca, d1}}$ y $m_{\text{seca, d7}}$ son los pesos de las muestras secas en los días 1 y 7 en ese intervalo, respectivamente.

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos de los ensayos de compostaje de las diferentes fundas: plásticas de PEBD, biodegradables y de papel, se presentan a continuación. Para el control de los ensayos se analizaron semanalmente el porcentaje de humedad de los experimentos, así como el contenido de cenizas y sólidos orgánicos totales. La cantidad de agua necesaria para mantener un medio óptimo para los microorganismos se añade semanalmente.

Al preparar los experimentos de compostaje con los diferentes tipos de fundas, las muestras de cada ensayo presentaban una humedad entre el 20 y 30 %. Con el objetivo de alcanzar condiciones óptimas de compostaje, se prosiguió a añadir agua a los ensayos hasta encontrar el porcentaje de humedad óptimo para los ensayos. Las condiciones iniciales se pueden observar en la Tabla 5.

Durante el inicio de los experimentos la temperatura osciló entre 17-22 °C. Pero cuando se estabilizó a la misma temperatura ambiental a la que se encuentra el laboratorio, entre 19-21 °C, se continuó haciendo mediciones de control esporádicas. Esto se puede observar en la Figura 5. La temperatura de los ensayos se encuentra por debajo del óptimo para compostaje, pero por encima de la temperatura mínima de degradación en el rango mesofílico. Esta baja temperatura indica una baja actividad bacteriana durante los ensayos, que se da bajo condiciones reales de compostaje.

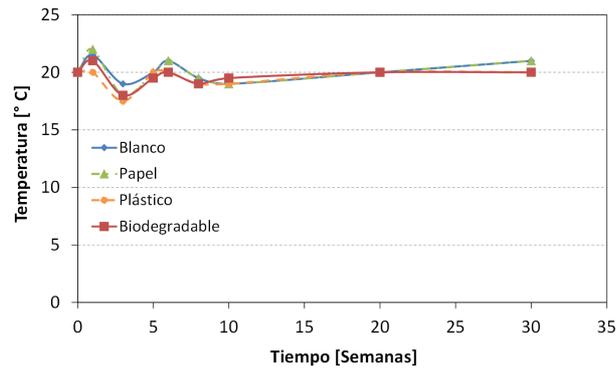


Figura 5: Temperatura de los ensayos.

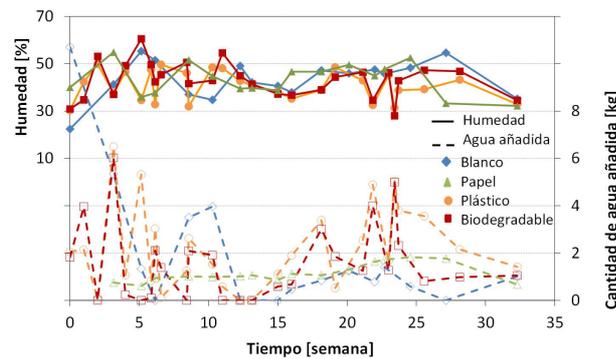


Figura 6: Porcentaje de humedad y cantidad de agua añadida por semana.

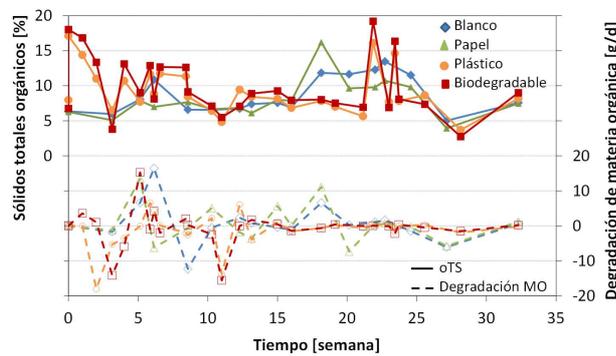


Figura 7: Porcentaje de sólidos totales orgánicos (oTS) y degradación de materia orgánica en base seca de cada ensayo.



Figura 8: Imágenes de los ensayos transcurridas 52 semanas de investigación a) blanco, b) papel, c) plástico 1, d) plástico 2, e) biodegradable 1, f) biodegradable 2.

No. de ensayo	Tipo de bolsa	Peso del ensayo [kg]	TS [%]	Humedad [%]	oTS [%]	Muestra seca [kg]	Material orgánico [kg]
1	-	12.5	64.86	35.14	7.57	8.11	0.95
2	Papel	12.5	66.75	33.25	7.49	8.34	0.94
3	Plástico PEBD 1	12.0	67.08	32.92	8,17	8.05	0.98
4	Plástico PEBD 2	14	70.17	29.83	11.53	9.82	1.61
5	Biodegradable 1	11.5	65.48	34.52	9.01	7.53	1.04
6	Biodegradable 2	13.5	62.66	37.34	9.82	8.46	1.33

Tabla 6: Características finales de los diferentes ensayos.

En la Figura 6 se presenta el porcentaje de humedad de los diferentes ensayos y la cantidad de agua añadida semanalmente. Durante los ensayos se desea mantener el contenido de humedad en un rango específico para favorecer la degradación de las muestras. Por lo que se realiza semanalmente balances de agua de cada ensayo y, utilizando las ecuaciones 5 y 6, se calcula la cantidad de agua que se debe añadir en cada ensayo. Se puede observar que la humedad oscila entre 30 y 60 %. La humedad deseada se encuentra en 45 %, pero se puede observar que existieron oscilaciones durante toda la investigación. Esto se debe a que los ensayos, a pesar de estar protegidos del sol directo, están expuestos a las condiciones climáticas en Cumbayá. Por lo tanto, sufren semanalmente de evaporación de agua ocasionada por días calurosos o exceso de humedad en días de lluvia. Sin embargo, se puede observar que desde la semana 11 hasta la 22 en los ensayos de fundas plásticas y degradables, o 28 en los ensayos en blanco y de papel, se alcanzan buenas condiciones de humedad entre 36-46 %. Pero en las últimas semanas nuevamente se tiene oscilaciones muy marcadas. La cantidad de agua agregada semanalmente a los ensayos varía entre cero hasta 5.0 kg de agua añadida para compensar la evaporación.

Los resultados de los análisis de sólidos totales orgánicos (oTS) y de la degradación de materia orgánica en los ensayos se presentan en la Figura 7. Se puede observar que el porcentaje de oTS tiene sus valores más bajos en las semanas 8 a 16. Para volverse a incrementar hasta la semana 24. Esto sucede en todos los ensayos, indistintamente del material que se investiga. Más interesante resulta observar la tasa diaria degradación de materia

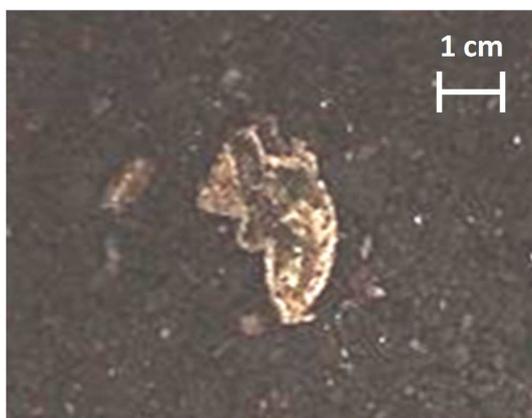


Figura 9: Pedazos de papel en el ensayo de papel a la semana 25.

orgánica calculada en base seca. Esto quiere decir que se elimina la variabilidad ocasionada por la humedad. En este caso se puede observar como para todos los ensayos la degradación baja prácticamente a cero a partir de la semana 12 para el plástico y las fundas biodegradables. El ensayo con la mayor variabilidad es con las fundas de papel, lo cual es entendible ya que el papel se degrada muy fácilmente en un medio propicio. Las variaciones que se observan, sobre todo en los ensayos con fundas plásticas y biodegradables se debe a aglomeraciones de los pedazos de fundas, lo cual hacía muy difícil la toma de muestras.

En la Figura 8 se presentan imágenes de los diferentes ensayos transcurridas 33 semanas de investigación. Al observar los ensayos se puede observar claramente que las fundas de papel se degradaron y no se las puede identificar en el ensayo (b), el cual no muestra diferencia visual con la muestra blanco. Al contrario los ensayos con los trozos de fundas de plástico (c y d), no presentan diferencia alguna con respecto al inicio de los ensayos. Asimismo en los ensayos con fundas de plásticos biodegradables (e y f), los retazos de fundas no muestran signos visuales de degradación. También se puede observar como los retazos se acumulan en la superficie del balde, a pesar de que semanalmente se agitaban los baldes para tener una repartición más homogénea de las muestras en el sustrato. La diferencia de densidad así como la diferente geometría entre la mezcla entre tierra / humus y las fundas plásticas hacía que los retazos de fundas se desplazaran hacia la superficie de los experimentos.

En la Tabla 6 se presentan las características finales de los seis ensayos. Se puede observar que al final del tiempo de investigación el porcentaje de humedad en todos los ensayos se encuentra aproximadamente en 30 %. Por otro lado, el contenido de material orgánico aumentó en casi todos los ensayos, lo cual se puede explicar por la generación de biomasa en el proceso de biodegradación. Pero los valores tienen un comportamiento errático que puede ser ocasionado por las heterogeneidades durante lo toma de muestras para los análisis que en un caso puede tener pequeñas piedras y en otras una mayor cantidad de restos de fundas.

Los resultados muestran que hay una gran fluctuación en las mediciones. Esto se debe a que el material que está siendo sometido a compostaje es muy heterogéneo. Los trozos de fundas plásticas y biodegradables tienden

a concentrarse en la superficie debido a su menor densidad comparada con el humus y la tierra.

Mediante inspección visual, las fundas biodegradables y plásticas de PEBD no se degradaron durante estas 33 semanas de investigación. Mientras que las fundas de papel se degradaron. A la semana 25 aún se podían encontrar trozos de papel como se muestra en la Figura 9. Sin embargo, a la semana 33 desaparecieron completamente todos los pedazos de las fundas de papel.

Conclusiones

La degradación de los plásticos normales y plásticos biodegradables es un proceso complejo que depende de la naturaleza de las fundas y de las condiciones a las que se encuentran expuestas. Este estudio inició con la investigación literaria sobre las propiedades y características de las diferentes fundas: plásticas, biodegradables y de papel, así como del proceso de compostaje.

En base a la revisión literaria previa y a los ensayos elementales de degradabilidad realizados se puede concluir que las fundas comercializadas en Ecuador como oxo-biodegradables, deberían denominarse como oxo-degradables; ya que por acción del aditivo oxo-degradante el proceso de desintegración se da por efectos de luz ultravioleta o térmicos.

Los ensayos se desarrollan al someter a las fundas al proceso de compostaje bajo condiciones reales. Los resultados muestran que las fundas de papel se degradan fácilmente al estar en contacto con agua, debido a sus propiedades hidrófilas y porosas, lo cual facilita su rápida descomposición. No se pudieron visualizar residuos de papel al concluir los ensayos.

Durante las 32 semanas de estudio no se observó ningún indicio de desintegración en las fundas de plástico ni en las oxo-biodegradables. Este resultado se esperaba en las fundas plásticas, pero se esperaba mayor degradación en las oxo-biodegradables. Esto nos llevó a analizar las condiciones a las cuales se realizaron los ensayos, que fueron temperaturas bajas y protección de la luz solar directa. Estas condiciones no son favorables para la oxo- o hidro- degradabilidad que requieren calor o luz ultravioleta, con lo cual se puede explicar que no se pudieron observar cambios en las fundas durante estos ensayos.

Los resultados de esta primera investigación de la degradación de las fundas biodegradables indican que no hay diferencia en la compostabilidad entre las fundas plásticas convencionales y degradables al ser sometidas en un medio de compost a menos que se garanticen las condiciones óptimas para su degradación.

En la segunda etapa se desean controlar más rigurosamente los parámetros y condiciones de compostaje, asegurando una temperatura controlada de 58°C y luz ultravioleta, para optimizar la desintegración de las fundas

degradables y poder determinar su velocidad de desintegración. También se quiere comprobar si adicional a la degradación química ocurre una degradación enzimática. Para lo cual se van a incluir ensayos con una fuente adicional de nutrientes sintéticos o residuos orgánicos a la tierra y el humus. Estos ensayos se pueden realizar siguiendo las metodologías descritas en las Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2640:2012 [31], NTE INEN 2641:2012 [32]. La determinación de la biodegradación aeróbica de los materiales plásticos después del compostaje se deberá realizar mediante la norma NTE INEN 2644:2013 [33], según la cual se debe medir la cantidad de CO₂ desprendido en el proceso.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad San Francisco de Quito por el apoyo brindado a las investigaciones realizadas en el Laboratorio de Desarrollo de Energías Alternativas (LaDEA-USFQ).

Referencias Bibliográficas

- [1] Ali, A.; Hasan, F.; Hameed, A.; Ahmed, S. 2008. "Biological degradation of plastics: A comprehensive review." *Biotechnology Advances*, 26: 246-265.
- [2] Ishigaki, T.; Sugano, W.; Nakanishi, A.; Tateda, M.; Ike, M.; Fujita, M. 2004. "The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors." *Chemosphere*, 54: 225-233.
- [3] Andrady, A.; Neal, M. 2009. "Applications and societal benefits of plastics." *Philosophical transactions of the royal society biological science*, 364: 1977-1984.
- [4] Mohee, R.; Unmar, G. 2007. "Determining biodegradability of plastic materials under controlled and natural composting environments." *Waste Management*, 27: 1486-1493.
- [5] Mohee, R.; Unmar, G. D.; Mudhoo, A.; Khadoo, P. 2008. "Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions." *Waste Management*, 28: 1624-1629.
- [6] Plastic Europe, 2014. "Plastics - The Facts 2014, an Online Reference" Enlace: <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-2014.aspx>. Fecha de Consulta: 13 Febrero 2014.
- [7] Lopez, J.; Aguilar, M.; Arraiza, P.; Leon, B. 2009. "Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions." *Waste Management*, 29: 1514-1519.
- [8] Mezzanotte, V.; Bertani, R.; Degli, F.; Tosin, M. 2005. "Influence of inocula on the results of biodegradation tests." *Polymer Degradation and Stability*, 87: 51-56.
- [9] ASTM D5988, 2003. "Standard test methods for determining aerobic biodegradation in soil of plastic materials or residual plastic materials after composting."

- [10] Norma Técnica Ecuatoriana; NTE INEN 2643:2013 "Especificación para plásticos compostables". *Primera Edición*.
- [11] Hermann, B.; Debeer, L.; Wilde, B.; Blok, K.; Patel, M. 2011. "To compost or no to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment." *Polymer Degradation and Stability*, 96: 1159-1171.
- [12] Vaverková, M.; Toman, F.; Adamcová, D.; Kotoviková, J. 2012. "Study of the Biodegradability of Degradable/Biodegradable Plastic Material in a Controlled Composting Environment." *Ecological Chemistry Engineering*, 19(3): 347-358.
- [13] Leejarkpai, T.; Suwanmanee, U.; Rudeekit, Y.; Mungcharoen, T. 2011. "Biodegradable kinetics of plastics under controlled composting conditions." *Waste Management*, 31: 1153-1161.
- [14] Larsen, J.; Venkova, S. 2014. "The downfall of the plastic bag: A global picture." *Earth Policy Institute*. Enlace: http://www.earth-policy.org/plan_b_updates/2014/update123. Fecha de Consulta: 25 de junio del 2014.
- [15] AlMaadeed, M.; Ouedemi, M.; Noorunnisa, P. 2013. "Effect of chain structure on the properties of Glass Fibre/polyethylene composites." *Material and Design*, 47: 725-730.
- [16] Sihama, S.; Abdulkhaliq, H.; Alyaa, A. 2013. "Comparison of the characteristics of LDPE: PP and HDPE:PP Polymer Blends." *Modern Applied Science*, 7(3).
- [17] Sivan, A. 2011. "New perspectives in plastic biodegradation." *Current opinion in Biotechnology*, 22: 422-426.
- [18] Koitabashi, M.; Noguchi, M.; Sameshima, Y.; Hiradate, S.; Suzuki, K.; Yoshida, S.; Watanabe, T.; Shinozaki, Y.; Tsushima, S.; y Kitamoto, H. 2012. "Degradation of biodegradable plastic mulch films in soil environment by phylloplane fungi isolated from gramineous plants" *AMB Express*, 2: 40-50.
- [19] Ortuño, A. 1995. "Introducción a la Química Industrial". 2da. Ed. España: Reverté.
- [20] Arminen, H.; Hujala, M.; Puumalainen, K.; Tuppara, A.; Toppinen, A. 2013. "An update on inter-country differences in recovery and utilization of recycled paper." *Resource, Conservation and Recycling*, 78: 124-135.
- [21] Kacik, F.; Kacikova, D.; Jablonsky, M.; Katuscak, S. 2009. "Cellulose degradation in newsprint paper ageing." *Polymer Degradation and Stability*, 94: 1509-1514.
- [22] Béguin, P.; Aubert, J. 1994. "The biological degradation of cellulose." *FEMS Microbiology Reviews*, 13: 25-58.
- [23] Rastogi, S.; Dwivedi, U. 2014. "Lignin genetic engineering for improvement of wood quality: Applications in paper and textile industries, fodder and bioenergy production". *South African of Botany*, 91: 107-125.
- [24] SCA. 2010. "Fabricación de papel". *Soporte técnico de los papeles para SCA Publication Papers*.
- [25] Leja, K.; Lewandowicz, G. 2010. "Polymer Biodegradation and Biodegradable Polymers." *Polish Journal of Environ. Stud.*, 19(2): 255-266.
- [26] Pagga, U.; Beimborn, D.; Boelens, J.; Wilde, B. 1995. "Determination of the aerobic biodegradability of polymeric material in a laboratory controlled composting test." *Chemosphere*, 31: 4475-4487.
- [27] Ren, X. 2003. "Biodegradable plastics: a solution or a challenge?" *Journal of Cleaner Production*, 11: 27-40.
- [28] European Committee for Standardization, EN 13432. 2000. "Packaging-Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation-Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging, European Standard." *European Committee for Standardization*. Brussels, Belgium.
- [29] ASTM, D6400-04. "2004 Standard Specification for Compostable Plastics". *ASTM: West Conshohocken, PA*.
- [30] Clesceri, L.; Greenberg, A.; Eaton, A. 1998. "Standard methods for the examination of water and wastewater." 20va. Ed. Baltimore: Maryland Composition Company.
- [31] Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2640:2012 "Método de ensayo para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos bajo condiciones controladas de compostaje". *Primera Edición*.
- [32] Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2644:2013 "Guía para la exposición y ensayo de plásticos que se degradan e el ambiente por una combinación de oxidación y biodegradación". *Primera Edición*.
- [33] Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2642:2012 "Método de ensayo para determinar la degradación aeróbica en el suelo de los materiales plásticos o de materiales plásticos residuales después de compostaje". *Primera Edición*.